

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт горного дела геологии и геотехнологии

институт

Горные машины и комплексы

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ А.В. Гилёв

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 2018 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»

код и наименование специализации

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМО-ЭЖЕКЦИОННОГО УДАЛЕНИЯ

тема

БУРОВОГО ШЛАМА ИЗ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН

Руководитель

подпись, дата

А.В. Гилёв

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

А.И. Миранов

инициалы, фамилия

Консультанты:

Экономическая часть

подпись, дата

А.Д. Бурменко

инициалы, фамилия

Безопасность
жизнедеятельности

подпись, дата

Н.М. Капличенко

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

А.В. Гилёв

инициалы, фамилия

Красноярск 2018

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт горного дела геологии и геотехнологии

институт

Горные машины и комплексы

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ А.В. Гилёв

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2018 г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме дипломной работы

Студенту Миранову Андрею Игоревичу

фамилия, имя, отчество

Группа ГМ 12-13 Направление (специальность)

21.05.04 Горное дело,

номер

код

специализация 21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Повышение эффективности пневмо-эжекционного удаления бурового шлама из взрывных скважин»

Утверждена приказом по университету № 705/с от 23 января 2018 года

Руководитель ВКР А.В. Гилёв, профессор, доктор технических наук
кафедры Горные машины и комплексы

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР режимы бурения взрывных скважин на ОГР и параметры.

Перечень разделов ВКР Введение, анализ современного состояния способов и средств удаления бурового шлама из скважин, экспериментальное исследования пневмо-эжекционного способа удаления бурового шлама, расчёт технико-экономических показателей процесса бурения взрывных скважин с пневмо-эжекционной эвакуацией бурового шлама, правила и техника безопасности при проведении буровых работ.

Перечень графического материала иллюстрационный материал для презентации ВКР в количестве 20 слайдов

Руководитель ВКР

подпись

А.В. Гилёв

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись, инициалы и фамилия студента

А.И. Миранов

« ____ » _____ 2018 г.

Реферат

Дипломная работа по теме: «Повышение эффективности пневмо-эжекционного удаления бурового шлама из взрывных скважин» содержит 71 страницу, 25 иллюстраций, 17 использованных источников, 20 слайдов графического материала.

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ЭВАКУАЦИИ БУРОВОГО ШЛАМА ИЗ СКВАЖИНЫ, ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ.

Цель дипломной работы:

- анализ способов удаления бурового шлама из технологических скважин;
- выбор и обоснование рационального способа очистки скважин от бурового шлама;
- лабораторные исследования пневмо-эжекционного эвакуатора;
- разработка конструктивной схемы пневмо-эжекционной эвакуации бурового шлама.

В результате проведения исследования на стенде пневмо-эжекционного эвакуатора было определена скорость движения частиц бурового шлама при пневматической, шнековой и комбинированной очистках. Была выявлена более эффективная очистка скважины от бурового шлама комбинированным способом по сравнению с пневматической и шнековой очистками.

В итоге был разработан ряд рекомендаций и предложения, для совершенствования конструкции стенда. Модернизированный стенд позволит вывести математические зависимости скорости движения частиц шлама от параметров сжатого воздуха и конструкции эвакуатора бурового шлама.

Содержание

<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	6
<u>1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УДАЛЕНИЯ БУРОВОГО ШЛАМА ИЗ СКВАЖИН</u>	7
1.1 Шнековый способ удаления бурового шлама.....	7
1.2 Удаление шлама с помощью жидкости.....	12
1.3 Пневматический способ удаления бурового шлама.....	23
1.4 Шнеко-пневматический способ удаления бурового шлама.....	31
1.5 Пневмо-жидкостный (эрлифтный) способ удаления бурового шлама.....	44
1.6 Пневмо-эжекционный способ удаления бурового шлама.....	51
1.7 Выводы.....	58
<u>2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМО- ЭЖЕКЦИОННОГО СПОСОБА УДАЛЕНИЯ БУРОВОГО ШЛАМА</u>	58
2.1 Экспериментальный стенд.....	58
2.2 Методика исследований.....	60
2.3 Результаты исследований.....	61
2.4 Выводы.....	63
<u>3 Техничко-экономическое обоснование применения пневмо-эжекционного удаления</u>	63
<u>4 Правила и техника безопасности при проведении буровых работ</u>	66
<u>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</u>	70
<u>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ</u>	71

ВВЕДЕНИЕ

Базисом всего промышленного производства является горная промышленность, осуществляющая добычу полезных ископаемых и обеспечивающая сырьевые потребности не только России, но и других стран. Основные объёмы горной массы подготавливаются к выемке буровзрывным способом, одним из главных производственных процессов которого является бурение взрывных скважин.

Буровой комплекс на открытых горных работах различного назначения представляет собой крупную ресурсоёмкую систему, в которой в настоящее время преобладает экстенсивное развитие. За последние годы рост производительности бурового оборудования практически прекратился. Происходит непрерывное значительное затрат на буровые работы, приходящихся на 1 м скважины.

В ближайшее десятилетие в России ожидаемые годовые объёмы бурения на открытых горных, земляных и строительных работах превысят 60 – 70 млн. м, освоение которых при устаревших существующих способах бурения потребует списочного состава буровых станков более 2 тыс. ед. и расходования в год 160 – 200 тыс. буровых долот. Ежегодные эксплуатационные затраты могут достигнуть более 6 млрд. руб., из них примерно 60 – 65 % составят затраты на буровые долота. Поэтому создание эффективных буровых инструментов и технологии их применения является весьма актуальной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение для развития горнодобывающей промышленности страны.

Буровой инструмент является самым высоко нагруженным и ответственным элементом бурового станка, определяющим способ бурения в соответствии со свойствами буриемых пород. Скоростные качества долота, его износостойкость и стоимость формируют главный критерий эффективной работы – удельный расход на единицу проходки, высокий уровень которого не соответствует современным требованиям, предъявляемым к использованию ресурсов предприятий.

Работа бурового долота органически сопряжена с технологическими процессами бурения и характеристиками исполнительных механизмов бурового станка. Поэтому необходимо обеспечивать согласованность параметров создаваемых новых моделей буровых инструментов с режимными параметрами разрушения пород и удаления продуктов разрушения из забоя скважины, а также с параметрами бурового станка (механизмов вращения, подачи инструмента и очистки скважины).

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СПОСОБОВ И СРЕДСТВ УДАЛЕНИЯ БУРОВОГО ШЛАМА ИЗ СКВАЖИН

1.1 Шнековый способ удаления бурового шлама

Механический способ удаления продуктов разрушения из скважин применяется при бурении неглубоких скважин в мягких и рыхлых породах специальными забойными инструментами: буровыми ложками, змеевиками и стаканами. Проходка на рейс в этом случае ограничена ёмкостью инструмента и составляет всего 0,2 - 0,6 м. Весь выбуренный объём породы поднимается на поверхность вместе с забойным инструментом, что снижает существенно производительность бурения.

Наиболее производительным из механических способов является транспортирование продуктов разрушения с помощью шнеков – винтовых транспортёров (рисунок 1). Рыхлая масса разрушенной породы в этом случае перемещается за счёт действия силы, возникающей на винтовой поверхности вращающегося шнека. Порода поднимается на поверхность одновременно с бурением колонной шнеков, длина которых соответствует глубине скважин.

Скорость перемещения материала и транспортная производительность шнековой колонны определяются главным образом числом оборотов n шнека и величиной шага винтовой реборды S .

$$v = \frac{Sn}{60}, \quad (1)$$

где v – линейная скорость перемещения материала, м/с.

Объём транспортируемой породы, или транспортная производительность шнека определяется выражением

$$Q_{\text{ш}} = 60 \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} Sn\varphi, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ш}}$ – производительность шнека, м³/ч; D – диаметр шнека в м; n – скорость вращения шнека, об/мин; φ – коэффициент наполнения шнека, зависящий от характера материала и размеров шнека: для сыпучих пород $\varphi = 0,3$; для вязких, липких пород $\varphi = 0,8$. Упрощая эту формулу получим

$$Q_{\text{ш}} = 47\varphi D^2 Sn. \quad (3)$$

Д.Н. Башкатов и Ю.А. Олоновский [1] производительность шнекового транспортёра определяют, исходя из выражения

$$Q_{\text{ш}} = V_{\text{п}}' \delta v_z, \quad (4)$$

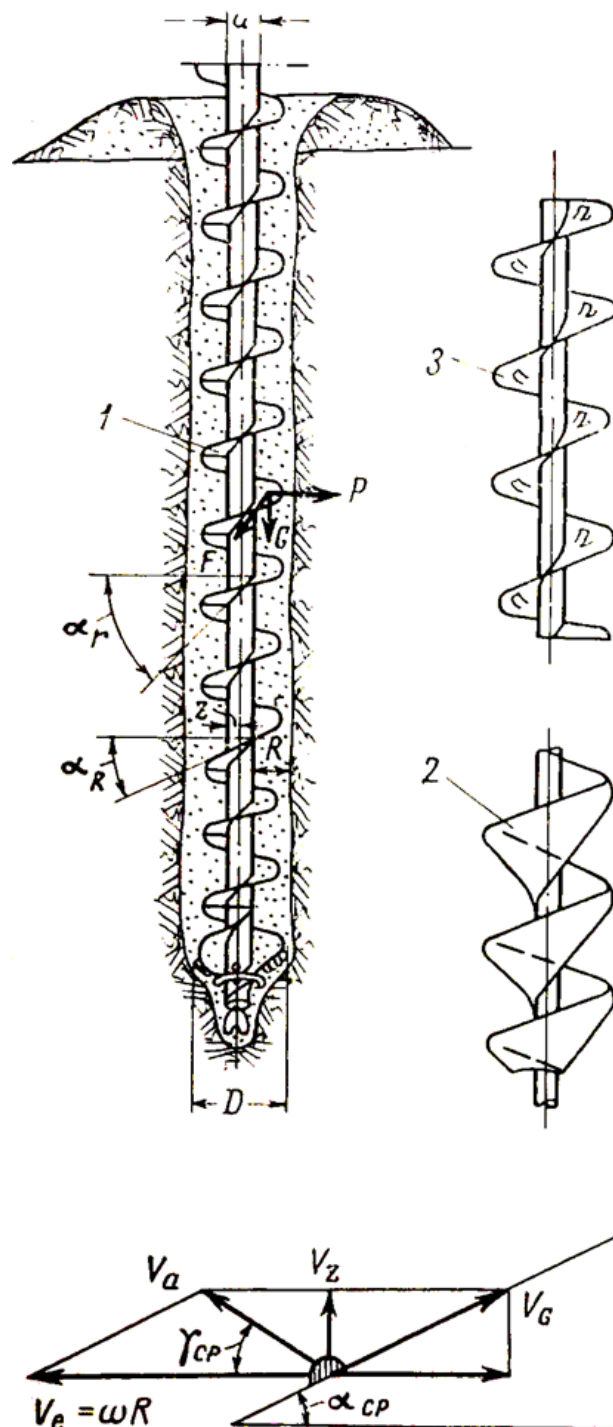


Рисунок 1 – Схема транспортирования частиц породы шнеком:

1, 2 – шнеки транспортирования сыпучих пород; 3 – шнек для транспортирования вязких пород.

где v_z – вертикальная составляющая абсолютной скорости перемещения частиц породы; δ – объёмный вес транспортирования породы; V_n' – приведённый объём породы на единицу высоты шнека

$$V_{\Pi}' = \frac{V_{\Pi}}{S}, \quad (5)$$

где $V_{\text{п}}$ – объём породы на одном витке шнека; S – шаг витка.

$$V_{\pi} = V_{\text{в}} \varphi = \pi(R^2 - r^2) \varphi S, \quad (6)$$

где $V_{\text{в}}$ – объём одного витка; φ – коэффициент наполнения шнека; R, r – наружный и внутренний радиусы реборды.

Подставляя найденное значение V_{π} в уравнении (5), находим, что $V_{\pi} = \pi(R^2 - r^2)\varphi$, а значение

$$Q_i = \pi(R^2 - r^2) \varphi \delta v_z. \quad (7)$$

Но вертикальная составляющая абсолютной скорости перемещения частиц породы, исходя из рисунка 1, имеет значение

$$V_z = \frac{\omega R}{(ctg \alpha_{\text{ср}} + ctg \gamma_{\text{ср}})}, \quad (8)$$

где ω – угловая скорость вращения шнека; $\alpha_{\text{ср}}$ – средняя величина угла подъёма винтовой линии шнека; $\gamma_{\text{ср}}$ – среднее значение угла между векторами абсолютной v_a и переносной v_c вдоль винтовой поверхности.

Подставляя значение v_z в выражение (7) и заменяя угловую скорость линейной, получим производительность шнека

$$Q = \frac{\pi^2 R n (R^2 - r^2) \varphi \delta}{30 (ctg \alpha_{\text{ср}} + ctg \gamma_{\text{ср}})}, \quad (9)$$

Отсюда видно, что транспортная производительность шнека существенно зависит от ширины спирали шнека ($R - r$) и радиуса R . Чем меньше эта величина, тем меньше транспортная производительность шнека. При бурении объём породы, поднимаемой шнеками, практически может быть и меньше в связи с небольшой скоростью бурения и низким коэффициентом заполнения шнека. Коэффициент полезного действия шнеков уменьшается с уменьшением их диаметра. При выборе диаметра шнеков следует руководствоваться ещё и величиной кусков транспортируемого материала. Примерные данные зависимости диаметра шнеков и размера транспортируемых кусков приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость диаметра шнеков и размера транспортируемых кусков

Наименование показателей	Диаметр шнека, мм						
	100	150	200	250	300	400	500
Максимальный размер однородных кусков (80% от всей массы), мм	10	15	18	22	25	35	45
Максимальный размер отдельных кусков (15% от всей массы), мм	25	40	50	65	75	100	125

Число оборотов шнека определяется главным образом его диаметром и характером транспортируемого материала. В промышленности число оборотов винтовых транспортёров колеблется от 20 до 200 в минуту. В практике бурения скважин его доводят до 300.

Примерная зависимость между числом оборотов и диаметром шнека может быть выражена следующим образом

$$n = \frac{90}{\sqrt{D}}, \text{ об/мин}, \quad (10)$$

где D – диаметр шнека, м.

Транспортную способность шнека Д.Н. Башкатов определяет двумя основными условиями: 1) минимальное число оборотов шнековой колонны, обеспечивающее подъём породы; 2) минимальное число оборотов шнековой колонны, обеспечивающее перемещение частиц породы к периферии шнека. Минимальное число оборотов шнека, обеспечивающее транспортирование пород вверх, может быть определено выражением

$$n_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(\sin \alpha_{cp} + f_{ш} \cos \alpha_{cp})}{R f_c K_1 K_2 (\cos \alpha - f_{ш} \sin \alpha)}}, \quad (11)$$

где g – ускорение силы тяжести, см/сек²; α_{cp} – среднее значение угла подъёма винтовой линии реборды шнека; f_{cp} – коэффициент трения частиц шлама о стенки скважины; $f_{ш}$ – коэффициент трения частиц шлама о винтовую поверхность шнека; R – радиус шнека, см; K_1 – коэффициент, учитывающий заполнение шнека, обычно принимается $K_1 = 0,9-0,8$; K_2 – коэффициент, учитывающий действие сил трения на транспортируемые частицы, принимается $K_2 = 0,9$.

Полагая $R = 9$ см; $\alpha_{cp} = 12^\circ$; $f_{ш} = 0,2$; $f_c = 0,5$; $g = 981$ см/с²; $K_1 = K_2 = 0,8$, будем иметь

$$n_1 = \frac{30}{3,14} \sqrt{\frac{981 * (0,208 - 0,2 * 0,978)}{9 * 0,5 * 0,8 * (0,978 - 0,2 * 0,208)}} \approx 80 \text{ об/мин.}$$

Анализ приведённой формулы позволяет сделать ряд практически полезных выводов. Например, улучшения транспортирующей способности шнека можно добиться уменьшением коэффициента трения породы о реборду шнека, поверхность которой должна быть возможно более гладкой (но не крашенной). Для этого её следует смазывать отработанным машинным маслом. Исходя из минимального значения числа оборотов, окружная скорость применяемых в практике бурения скважин шнеков должна быть в пределах 1,5 – 2,0 м/с. Эффективная работа шнека при условии, что поднимаемая порода центробежными усилиями должна перемещаться к периферии. При недостаточной скорости

вращения шнека этого не произойдёт, и часть породы, расположенная ближе к центру вращения шнека, подниматься не будет.

Второе условие нормальной работы шнека может быть выражено зависимостью вида (рисунок 1).

где P – сила инерции, действующая на частицу породы, определяемая выражением

$$P = \frac{\pi^2 n^2 r G}{900g}, \quad (12)$$

F – сила трения частицы породы о поверхность шнека

$$F = G \cos \alpha_r f_{\text{ш}}, \quad (13)$$

где G – сила веса частицы породы; n – число оборотов шнека; r – радиус бурильной трубы (внутренний радиус шнека); g – ускорение силы тяжести; α_r – угол подъёма винтовой линии у бурильной трубы; $f_{\text{ш}}$ – коэффициент трения частиц породы о поверхность шнека. Используя найденные значения P и F , можно определить минимальное значение числа оборотов шнека, при котором частицы породы будут перемещаться к периферии шнека и транспортироваться на поверхность.

$$n_2 \geq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g f_{\text{ш}} \cos \alpha_r}{r}}. \quad (14)$$

Принимая $r = 3,66$ см; $f_{\text{ш}} = 0,2$ и $\alpha_r = 31^\circ$, имеем

$$n_2 = \frac{30}{3,14} \sqrt{\frac{984 * 0,2 * 0,857}{3,66}} = 19,8 \text{ об/мин.} \quad (20)$$

Шаг винтовой линии шнека определяет наклон винтовой реборды и скорость транспортирования породы. Зависит этот параметр от свойств транспортируемого материала и диаметра шнеков. Чем более сыпучий материал, тем меньше должен быть наклон реборды, а, следовательно, и шаг, который в зависимости от диаметра, имеет значение $S = (0,5 + 0,8)D$.

Для транспортирования материала шнековая колонна, заполненная по всей длине разбуренной породой, воспринимает значительный момент от сил трения, что требует расхода значительной мощности, примерную величину которой можно определить пользуясь выражением

$$N_{\text{тш}} = \frac{Q_{\text{ш}} H}{270} + K \frac{Q_{\text{ш}} L}{270}, \text{ кВт}, \quad (21)$$

где $Q_{\text{ш}}$ – производительность шнека, т/ч; H – высота подъёма материала (по вертикали), м; L – длина шнека, м; K – коэффициент, учитывающий потери мощности в шнеке. При бурении скважин шнек располагается вертикально, следовательно, $H = L$. Тогда с учётом к.п.д. передачи η будем иметь

$$N_{\text{тш}} = \frac{Q_{\text{ш}} L}{270\eta} (1 + K), \text{ кВт.} \quad (22)$$

Коэффициент K зависит от физико-технических свойств транспортируемого материала, величины отдельных кусков или частиц, соотношения диаметров шнека и скважины, конструкции шнека и др. Так, например, для угля $K = 2$, а для пека $K = 4$. Эти данные должны уточняться опытным путём. С учётом стеснённых условий работы шнековой колонны в скважине мощность на её вращение и транспортирование продуктов разрушения значительно выше.

На транспортную способность шнеков существенное влияние оказывает характер транспортируемого материала. Сыпучий материал и плывуны транспортируются более трудно. В этом случае рекомендуется уменьшать шаг винта и придавать рациональную форму реборде (рисунок 1). Сильно липкий материал также транспортируется с трудом. Так, при бурении по увлажнённым жирным глинам шнек залипает и прекращает транспортирование. Чтобы улучшить работу шнека, следует уменьшать подачу и применять фасонные шнеки.

1.2 Удаление шлама с помощью жидкости

Удаление продуктов разрушения в этом случае осуществляется потоком циркулирующей жидкости или промывкой скважины.

В практике бурения геологоразведочных скважин используются три основные схемы промывки: прямая, обратная и комбинированная. При этом может происходить полная, неполная или местная (призобойная) циркуляция жидкости.

В случае осуществления прямой промывки (рисунок 2, схема I) жидкость нагнетается с помощью насоса 1 по шлангу 2 через сальник 3 и бурильные трубы 4. Двигаясь вниз по трубам, жидкость омывает забой и торец забойного инструмента 5 и поднимается по стволу скважины вверх, вынося частицы разрушенной породы. На поверхности жидкость, циркулируя по специальным очистным желобам 6 и отстойникам 7, освобождается от шлама (частиц породы) и вновь захватывается насосом из приёмного чана 8 через всасывающий шланг 9.

Если промывочная жидкость выходит из скважины и вновь используется, получается полная схема циркуляции. В случае ухода жидкости в пласты пород, т.е. полного поглощения или потери, имеет место неполная циркуляция – жидкость достигает забоя, но не выходит на поверхность через устье скважины. Это вызывает дополнительные расходы на доставку жидкости и некоторые осложнения, хотя при этом процесс бурения практически может осуществляться.

Прямая система промывки скважин характеризуется простотой осуществления, но имеет ряд недостатков, основными из которых являются:

1. Возможное разрушение керна при бурении колонковыми снарядами в породах слабоустойчивых к динамическим воздействиям потока промывочной жидкости, что приводит к снижению процента выхода и представительности керновой пробы. Под напором потока куски керна прижимаются друг к другу, что приводит к их заклиниванию, интенсивному истиранию и размыванию.

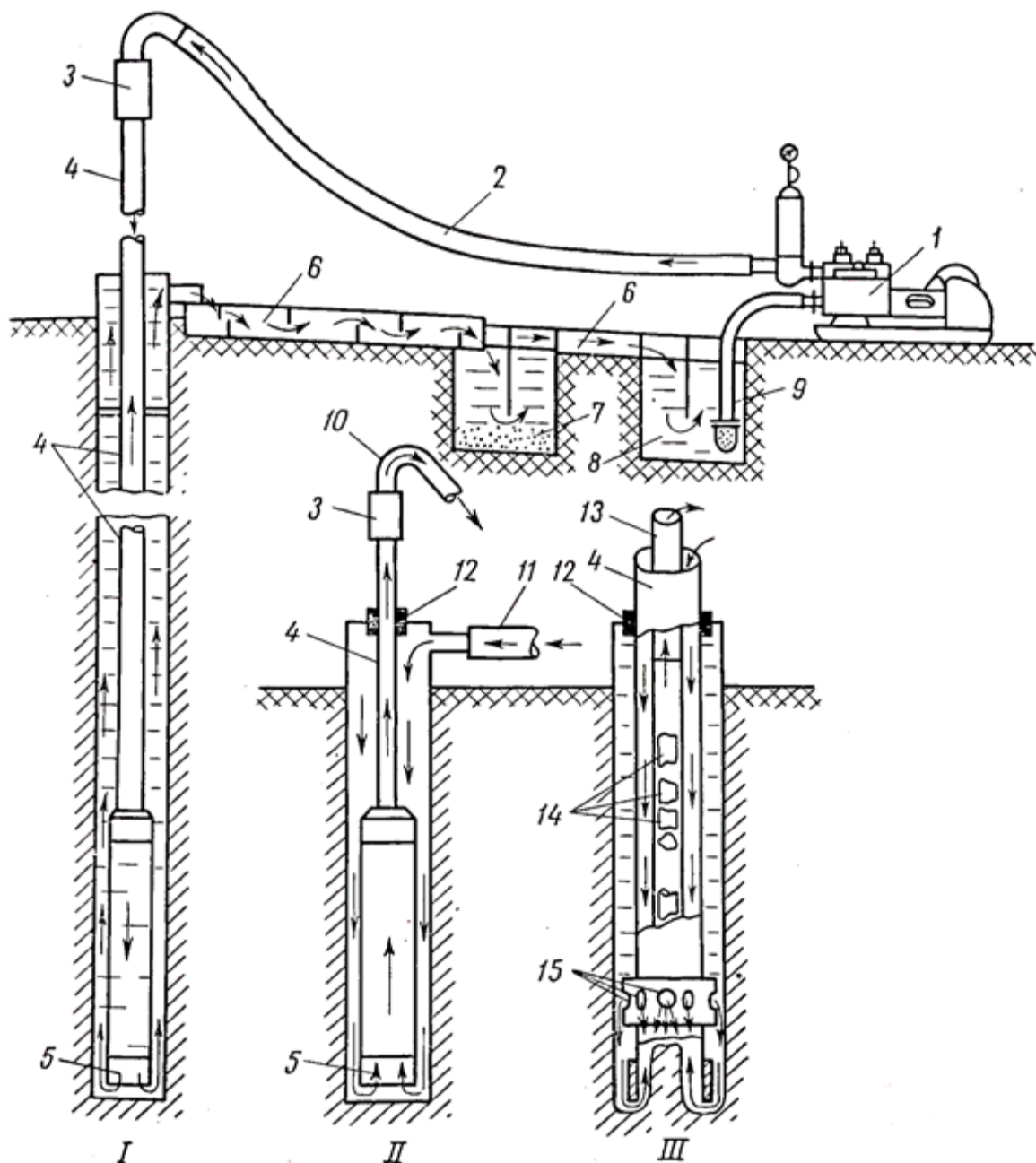


Рисунок 2 – Схема прямой, обратной и комбинированной промывок скважин:

- 1 – насос; 2 – шланг; 3 – сальник; 4 – бурильные трубы; 5 – коронки; 6 – циркуляционные желоба для очистки; 7 – отстойник; 8 – приёмный чан насоса; 9 – всасывающий шланг; 10 – сливной шланг; 11 – нагнетательный шланг; 12 – сальниковое уплотнение; 13 – водоподъёмная труба; 14 – кусочки керна, транспортируемые промывочной жидкостью; 15 – отверстия для выхода промывочной жидкости в скважину.

2. Ухудшение условий взятия шламовых проб на поверхности при плохом выходе керна, так как на поверхность выносятся не только частицы разрушенной

породы на забое, но и увлекаемые со стенок скважины. Или наоборот, часть забойного шлама может быть унесена жидкостью при её поглощении в трещины или каверны горных пород. В том и другом случаях, отработанная на поверхности шламовая проба с полезными ископаемыми может оказаться разубоженной, или обогащённой. Наконец, при полном поглощении жидкости шлам вообще не выносится на поверхность.

3. Увеличение расхода жидкости, в особенности при бурении скважин значительного диаметра, в связи с необходимостью создать достаточно большую скорость восходящего потока, обеспечивающего вынос частиц разрушенной породы на поверхность. Это влечет за собой увеличение производительности насосов и расходуемой мощности.

4. Увеличение возможностей возникновения аварии за счёт обвалов стенок скважины, сложенных неустойчивыми, легко размываемыми породами, за счет оседания шлама, накопившегося в различных полостях (трещинах, кавернах) стенок скважины или в момент прекращения циркуляции жидкости.

При обратной промывке скважин (рисунок 2, схема II) жидкость насосом подается по шлангу через патрубок и специальное сальниковое устройство на устье в полость скважины. Омывая забой и торец забойного инструмента, жидкость поднимается по бурильным трубам вверх и через сальник, шланг и очистную систему попадает в приемный чан, откуда вновь захватывается насосом и попадает в скважину. В этом случае жидкость поднимается со значительно большей скоростью по небольшому сечению бурильных труб, что способствует выносу на поверхность. Довольно крупных частиц разрушенной породы и даже позволяет транспортировать на поверхность керн. Однако при этом могут происходить частые засорения отверстий в буровом инструменте, а при колонковом бурении возможно заклинивание керна шламом в момент прекращения циркуляции жидкости и преждевременное прекращение рейса.

Обратная схема циркуляции жидкости может осуществляться также при помощи двойной колонны бурильных труб, расположенных концентрически (см. рисунок 2, схема III). Наружная колонна при этом имеет резьбовые соединения и служит для передачи усилий забойному инструменту, а внутренняя - стыкуется при помощи специальных скользящих соединений с уплотнёнными кольцами. Промывочная жидкость в этом случае подается в кольцевое пространство между трубами через специальный сальник-вертлюг и далее к забою через отверстия в коронке или долоте. В связи с тем, что затрубное пространство в скважине у забоя перекрывается специальным сальником (пакером) или заполняется раствором с большим удельным весом, промывочная жидкость, подхватывающая частицы выбуренной породы, устремляется в центральный канал внутренней колонны и поднимается на поверхность по трубам. При этом могут подниматься и куски керна.

Схема обратной полной циркуляции может осуществляться путём нагнетания жидкости или отсасывания её насосами (поршневыми, центробежными, вакуумными или водоструйными), расположенными на поверхности земли или в устье скважины. Обратная циркуляция жидкости может быть неполной – местной (призабойной или внутрискважинной) – со сбором

выбуренной породы в специальные шламоулавливающие устройства и подъёмом её механическим способом на поверхность. Такой способ удаления продуктов разрушения относится к комбинированному – гидромеханическому. Система обратной промывки скважин имеет целый ряд преимуществ, основными из которых являются следующие:

1. Возможность получения высокой скорости восходящего потока при меньшем расходе и потере напора жидкосты, что обеспечивает хорошую очистку скважины от шлама.

2. Возможность создания условий для лучшего сохранения керна а счёт благоприятного действия восходящего потока промывочной жидкости в колонковом снаряде. При это куски керна меньше прижимаются друг к другу, как бы взвешиваясь в потоке, что резко уменьшает их истирание, устраняет самозаклинивание и в целом разрушение кернового материала.

3. При доостаточно высокой скорости восходящего потока и соответствующей конструкции бурового снаряда создается возможность осуществлять непрерывный вынос керна на поверхность, что позволяет увеличить длительность рейса до полного затупления породоразрушающего инструмента, лучше сохранить керн и получить более представительную шламовую пробу.

4. Уменьшение расхода жидкости по сравнению с прямой схемой циркуляции, что позволяет применять насосы с меньшей производительностью и проводной мощностью.

5. Уменьшение возможностей возникновения аварий из-за разрушения потоком жидкости, движущимися с небольшой скоростью, неустойчивых стенок скважин, а в случае применения двойной колонны бурильных труб разрывающее действие потока жидкости практически исключается (рисунок 2, схема III).

6. Уменьшение возможностей возникновения аварий из-за прихвата снаряда шламом, так как он выносится по внутреннему каналу в затрубное пространство. Оседающий шлам внутри колонкового снаряда при прекращении циркуляции жидкости в конце рейса способствует заклиниванию, срыву керна и удерживанию его во время подъёма снаряда.

7. Уменьшение потерь промывочной жидкости при создании обратной циркуляции за счёт отсасывания её с поверхности или при применении двойной колонны труб.

Комбинированная схема циркуляции промывочной жидкости – пряма в колонне бурильных труб и в стволе скважины и обратная в призабойной части скважины и буровом снаряде – заключается в том, что жидкость поступает по бурильным трубам вниз, а по скважине поднимается вверх. Выше колонковой трубы бурового снаряда поток выходит в затрубное пространство и часть (или весь поток) поступает по кольцевому зазору к забою, омывает торец породоразрушающего инструмента и через внутреннюю полость снаряда вновь попадает в затрубное пространство, вынося продукты разрушения. Такая схема промывки может осуществляться с применением специальных снарядов или призабойных насосов различных конструкций, опускаемых в скважину [2]. На рисунке 3 показаны принципиальные схемы комбинированной промывки скважин. При этом внутренний поток может быть вызван напором прямого потока (схема I)

или подсосом при помощи погружного насоса водоструйного типа (схема II) или при помощи поршневого насоса двойного действия с гидродвигателем (схема III). Для того чтобы обеспечить необходимую интенсивность обратного потока, в некоторых случаях прибегают к помощи уплотняющих устройств (пакеров), перекрывающих зазор между снарядом и стенками скважины и разделяющих прямой и обратный потоки (рисунок 3, схема I). При использовании двойной колонны труб (с гидравлическим подъёмом керна) затрубное пространство заполняют более тяжёлым раствором, создающим противодавление (рисунок 3, схема III).

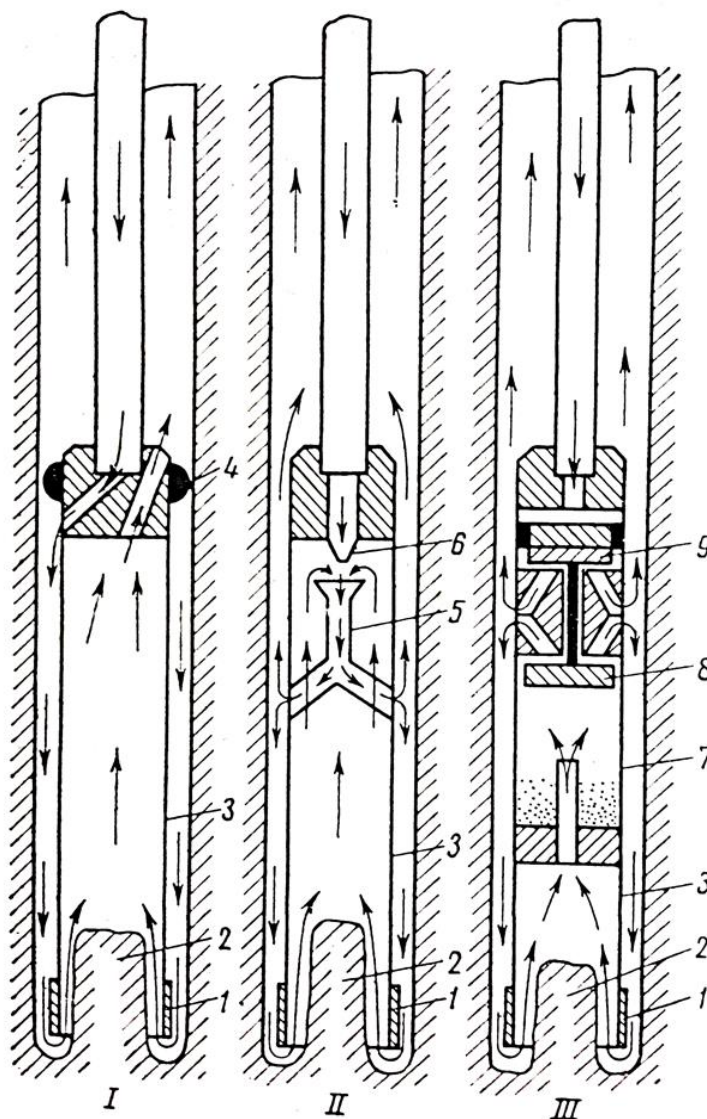


Рисунок 3 – Схемы комбинированной промывки скважин (обратная призабойная циркуляция):

1 – коронка; 2 – керн; 3 – колонковая труба; 4 – сальник; 5, 6 – эжекторное устройство;
7 – шламоулавливающая труба; 8 – всасывающая труба; 9 – гидродвигатель турбинного типа

Движение обратного потока в призабойной части скважины в обычных случаях может быть непрерывным и периодическим, пульсирующим с той или иной частотой. Такая схема циркуляции может осуществляться с помощью

специальных устройств, например, конструкции В.В. Большакова [3] или ПН-1, ПН-2 конструкции СГИ [4]. Такая система промывки при бурении скважины с обратной схемой циркуляции жидкости в снаряде в условиях частичного или полного поглощения жидкости. Однако в случае применения первой схемы (рисунок 3) при плохом перекрытии кольцевого зазора выше места выода жидкости из снаряда весть может устремиться вверх по стволу скважины, что вызывает прекращение циркуляции жидкости в снаряде, зашламования забоя и прижог коронки.

Успех бурения скважин в большой степени зависит от интенсивности удаления разрушенной породы с забоя и выноса её на поверхность. При бурении с промывкой это достигается за счёт циркуляции промывочной жидкости с определённой скоростью. При недостаточной скорости движения потока жидкости крупные частицы породы будут накапливаться на забое и в стволе скважины, что приведёт к снижению эффективности бурения, а в мм случае прекращения циркуляции жидкости – к прихвату снаряда осевшим шламом.

Известно, что вынос частиц на поверхность будет происходить при условии, что скорость восходящего потока жидкости $v_{ж}$ больше скорости падения частиц в спокойной жидкости u на величину желаемой скорости выноса $v_{в}$, т. е.

$$v_{ж} = u + v_{в}, \quad (23)$$

Частицы тонут в спокойной жидкости в том случае, если они имеют удельный вес, больший удельного веса жидкости. Вначале они падают с некоторым ускорением, а затем приобретают постоянную скорость вследствие сопротивления жидкости. Эту скорость приближённо определяют по формуле Риттингера.

На погружающееся в жидкость шарообразное тело действуют три силы (рисунок 4): G – сила веса частиц; P – сила, равная весу жидкости, вытесненной частицей; W – сила сопротивления движению частицы в жидкости. Наибольшее значение силы сопротивления движению частицы в жидкости будет при $W = G - P$ тело движется без ускорения, с постоянной скоростью. Вес частицы определяется выражением

$$G = V\gamma_{п}, \quad (24)$$

где V – объём частиц; $\gamma_{п}$ – удельный вес породы.

Для упрощения расчётов форму частиц шлама принимают шарообразной, имеющей диаметр d . Тогда

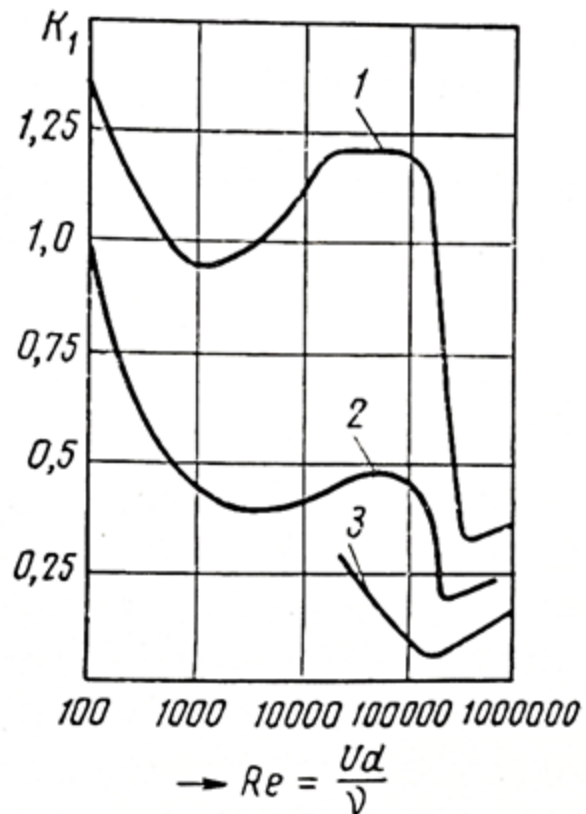
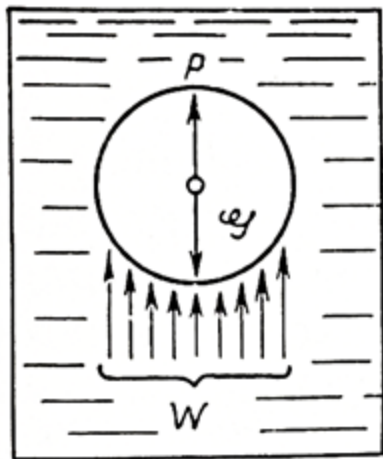


Рисунок 4 – Схема действия сил на погружающуюся в жидкость частицу и диаграмма для определения коэффициента K_1 в зависимости от значения числа Рейнольдса:

1 – для частиц цилиндрической формы; 2 – шарообразной формы; 3 – эллипсоидной формы

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \gamma_{\text{п}}, \quad (25)$$

Сила, равная весу вытесненной жидкости, определяется выражением

$$P = V \gamma_{\text{ж}} = \frac{\pi d^3}{6} \gamma_{\text{ж}}, \quad (26)$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ – удельный вес жидкости.

Сила сопротивления движущемуся телу в жидкости определяется выражением

$$W = K_1 F \frac{u^2}{2g} \gamma_{\text{ж}}, \quad (27)$$

где u – скорость движения тела в жидкости, м/с; F – площадь сопротивления (максимальная площадь сечения тела, перпендикулярная его движению), м^2 ; $\gamma_{\text{ж}}$ – вес 1 м^3 жидкости, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; K_1 – коэффициент, величина которого зависит в значительной степени от формы тела, его размеров,

положения в жидкости, её вязкости. Коэффициент K_1 является функцией числа Рейнольдса $K_1 = f(Re)$, где

$$Re = \frac{Lu_{\text{ср}}}{\nu}, \quad (28)$$

где $u_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения тела в неподвижной жидкости, м/с; L – линейное измерение сечения (для шара – диаметр d); ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости, равный коэффициенту абсолютной вязкости, поделённому на плотность (для воды при $t = 0^\circ\text{C}$, $\nu = 0,017 \text{ см}^2/\text{с}$ при $t = 20^\circ\text{C}$, $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$, для глинистых растворов $\nu = 0,02 - 0,06 \text{ см}^2/\text{с}$).

Значение K_1 определяется экспериментально. На рисунке 4 приводится диаграмма для определения K_1 в зависимости от числа Рейнольдса. Н.Д. Алексеев для пластинчатых частиц даёт эмпирическую формулу

$$K_1 = 2,454\nu^{0,138}, \quad (29)$$

Подставив в выражение $W = G - P$ значения всех величин, получим

$$\frac{K_1 F u^2 \gamma_{\text{ж}}}{2g} = V\gamma_{\text{п}} - V\gamma_{\text{ж}},$$

откуда

$$u = \sqrt{\frac{V(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{ж}})2g}{K_1 F \gamma_{\text{ж}}}}, \quad (30)$$

Заменяя объём и площадь сечения частиц, имеющих форму шара, их значениями, получим

$$u = \sqrt{\frac{d(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{ж}})}{\gamma_{\text{ж}}}} * \sqrt{\frac{4g}{3K_1}}, \quad (31)$$

Обозначив $\sqrt{\frac{4g}{3K_1}}$ через K , будем иметь

$$u = K * \sqrt{\frac{d(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{ж}})}{\gamma_{\text{ж}}}}, \quad (31)$$

Эта формула была выведена Риттингером. Здесь d – диаметр частиц, м. Для частиц шарообразной формы в среднем принимают $K_1 = 0,5$, тогда коэффициент K будет иметь значение

$$K = \sqrt{\frac{4 * 9,81}{3,05}} = 5,11.$$

Для частиц неправильной или плоской формы $K = 2,5 \div 4$.

В глинистом растворе, обладающем структурой, частицы даже с большим удельным весом не утонут, если они имеют размеры меньше критических величин. Падение частиц в глинистом растворе будет происходить только тогда, когда нормальные и касательные напряжения τ на их поверхности, возникающие под действием силы веса G , окажутся больше статического напряжения сдвига ν раствора. Если принять для частиц наиболее неблагоприятную шаровую форму, то касательное напряжение, возникающее на поверхности шарообразной формы частицы, может быть определено из выражения

$$\tau = \frac{G}{S} = \frac{d_0(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{р}})}{6}, \quad (32)$$

где τ – касательное напряжение, гс/см²; G – вес частицы в растворе, г; S – площадь поверхности частицы, см²; $\gamma_{\text{п}}$ – удельный вес породы, гс/см³; $\gamma_{\text{р}}$ – удельный вес глинистого раствора, гс/см³; d_0 – максимальный критический диаметр частиц, не тонущих в растворе, см.

Нормальное напряжение, создаваемое глинистым раствором, зависит от формы и размеров частиц. Частицы начнут падать, когда касательные напряжения несколько превысят статическое напряжение сдвига, т.е. когда $\tau > \nu$. Но вокруг шара возникают ещё и нормальные напряжения, поэтому давление к поверхности шара, достигнут величин νm . Влияние этого фактора учитывается специальным коэффициентом m , который определяется опытным путём. Величина его колеблется в основном от 2 до 3, что видно из приведённого графика (рисунок 5). Таким образом, условием предельного равновесия для частиц размером d_0 будет

$$\tau = m\nu = \frac{d_0(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{р}})}{6}, \quad (33)$$

откуда критический диаметр частиц, не падающих в растворе, будет иметь значение

$$d_0 = \frac{6m\nu}{\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{р}}}, \quad (34)$$

Все частицы породы удельного веса $\gamma_{\text{п}}$, имеющие размер больше d_0 , будут тонуть в глинистом растворе с удельным весом $\gamma_{\text{р}}$. Фактически диаметр

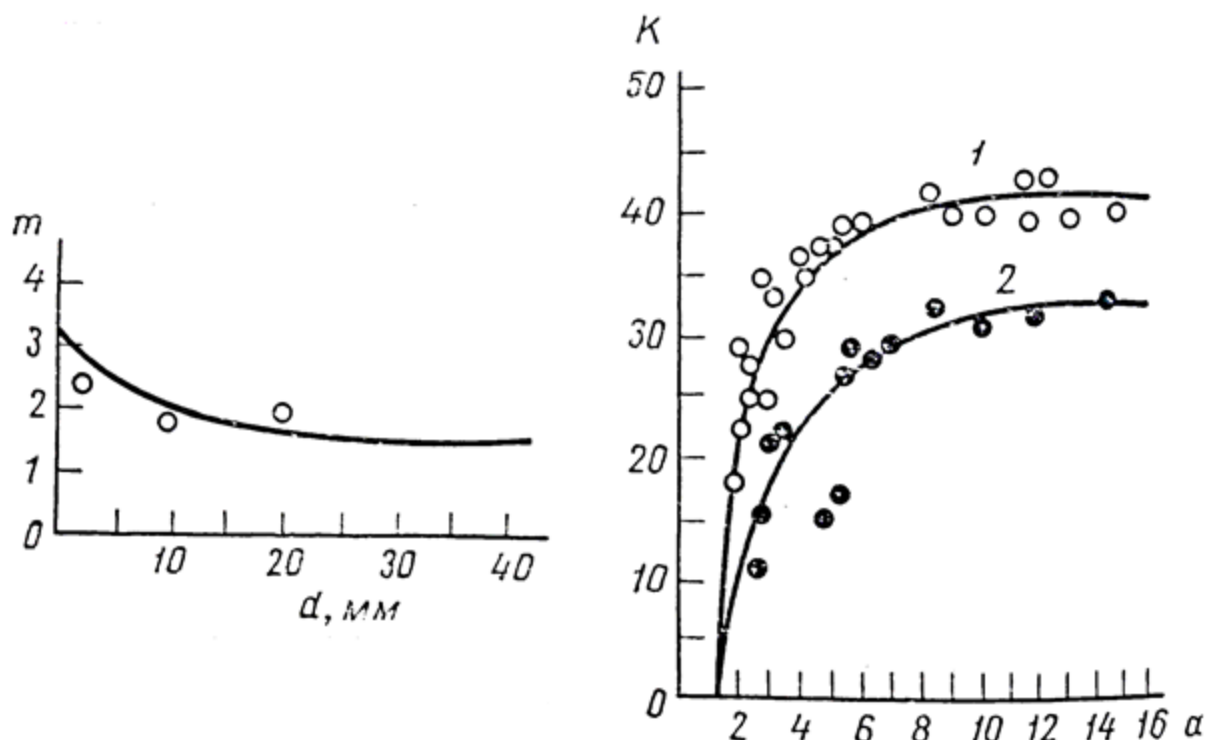


Рисунок 5 – Графики изменения коэффициента формы зёрен m от их диаметра и коэффициента K в зависимости от величины отношения диаметров частиц a :

1 – для частиц шарообразной формы; 2 – для частиц кубической формы

выбуриваемых частиц d может быть и больше, и меньше критического d_0 . Обозначим их отношение буквой a , тогда

$$a = \frac{d}{d_0}, \quad (35)$$

Если $a < 1$, т.е. $d < d_0$, частицы породы не будут тонуть в глинистом растворе. При $a > 1$, когда $d > d_0$, частицы будут тонуть, если их удельный вес не меньше удельного веса глинистого раствора. Скорость падения частиц при $a > 1$ может быть определена по ранее приведённой формуле Риттингера (31). Коэффициент K зависит в этом случае от величины a и определяется опытным путём (рисунок 5).

Величина скорости выноса частиц v_b должна обеспечить полное удаление выбуриваемой породы из скважины. Определяется она значениями удельных весов породы и раствора и скоростью бурения, т.е. количеством выбуриваемых в единицу времени частиц породы. В противном случае будет происходить зашламовывание скважины, значительное повышение удельного веса жидкости, выходящей из скважины, а это приводит к повышению давления насоса и другим осложнениям.

Если обозначить $V_{кп}$ – объём кольцевого пространства между штангами и стенками скважины, m^3 ; $V_{п}$ – объём породы, поднимающейся в кольцевом пространстве, m^3 ; $\gamma_{п}$ – удельный вес породы, $тс/м^3$; $\gamma_{1р}$ – удельный вес раствора, нагнетаемого в скважину, $тс/м^3$; $\gamma_{2р}$ – удельный вес раствора, выходящего из скважины, $тс/м^3$; то удельный вес жидкости, выносящей частицы разрушаемой породы из скважины, можно определить из выражения

$$\gamma_{2p} = \frac{(V_{\text{кп}} - V_{\text{п}})\gamma_{1p} + V_{\text{п}\gamma\text{п}}}{V_{\text{кп}}} = \frac{V_{\text{п}\gamma\text{п}} + V_{\text{кп}}\gamma_{1p} - V_{\text{п}}\gamma_{1p}}{V_{\text{кп}}}, \quad (36)$$

Обозначив D – диаметр скважины, м; $d_{\text{бт}}$ – диаметр бурильных труб, м; $D_{\text{к}}$ – диаметр керна, м; L – глубина скважины, м; $v_{\text{м}}$ – механическая скорость бурения, м/с; $v_{\text{в}}$ – скорость выноса частиц, м/с; найдём объём кольцевого пространства

$$V_{\text{кп}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_{\text{бт}}^2) L = F_{\text{кп}} L, \quad (37)$$

где $F_{\text{кп}}$ – площадь сечения кольцевого пространства между стенками скважины и бурильными трубами.

Объём породы при разрушении кольцевым забоем будет

$$V_{\text{п}} = \frac{\pi(D^2 - k_1 D^2 k)}{4} v_{\text{м}} \frac{l}{v_{\text{в}}} = F_{\text{кз}} v_{\text{м}} \frac{l}{v_{\text{в}}}, \quad (38)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий процент извлечения керна; l – величина проходки за рейс, м; $F_{\text{кз}}$ – площадь кольцевого забоя.

При бурении сплошным забоем

$$v_{\text{п}} = \frac{\pi D^2 l}{4 v_{\text{в}}} v_{\text{м}} = F_{\text{кз}} v_{\text{м}} \frac{l}{v_{\text{в}}}, \quad (39)$$

Подставив полученные значения объёмов в выражение (36), будем иметь

$$\gamma_{2p} = \frac{F_0 v_{\text{м}} \frac{l}{v_{\text{в}}} \gamma_{\text{п}} + F_{\text{кп}} \gamma_{1p} - F_0 v_{\text{м}} \frac{l}{v_{\text{в}}} \gamma_{1p}}{F_{\text{кп}} L}, \quad (40)$$

где F_0 – приведённая площадь забоя.

Отсюда желаемая скорость выноса частиц

$$v_{\text{в}} = \frac{F_0 v_{\text{м}} (\gamma_{\text{п}} - \gamma_{1p})}{F_{\text{кп}} (\gamma_{2p} - \gamma_{1p})}, \text{ м/с}, \quad (41)$$

Здесь произведение $F_0 v_0$ является объёмом породы, выбуриваемой в единицу времени. При бурении сплошным забоем

$$v_{\text{в}} = \frac{D^2 v_{\text{м}} (\gamma_{\text{п}} - \gamma_{1p})}{(D^2 - d_{\text{бт}}^2) (\gamma_{2p} - \gamma_{1p})}, \quad (42)$$

При бурении кольцевым забоем

$$v_b = \frac{(D^2 - K_1 D_k^2) v_m (\gamma_p - \gamma_{1p})}{(D^2 - d_{от}^2) (\gamma_{2p} - \gamma_{1p})}, \quad (43)$$

Отсюда видно, что при одинаковой скорости бурения, скорость выноса частиц v_b в случае кольцевого забоя может быть меньше, чем при бурении сплошным забоем, а с уменьшением величины зазора между штангами и стенками скважины скорость выноса возрастает. Разность удельных весов заканчиваемого раствора и жидкости, выходящей из скважины $(\gamma_{2p} - \gamma_{1p})$, не должна превышать величины 0,03. Определяется она качеством раствора и глубиной скважины. Обозначив $(\gamma_{2p} - \gamma_{1p})$ через K_0 , будем иметь

$$v_b = \frac{F_0 v_m (\gamma_p - \gamma_{1p})}{K_0 F_{кп}}, \quad (44)$$

Таким образом, скорость движения восходящего потока жидкости, обеспечивающая вынос частиц породы, определяется выражением

$$v_{ж} = K \sqrt{\frac{d(\gamma_p - \gamma_{1p})}{\gamma_p}} + \frac{F_0 v_m (\gamma_p - \gamma_{1p})}{K_0 F_{кп}}, \quad (45)$$

где $v_{ж}$ – скорость восходящего потока жидкости, м/с; K – опытный коэффициент; d – диаметр частиц шлама, м; γ_p – удельный вес породы, тс/м³; γ_{1p} – удельный вес раствора или жидкости, тс/м³; F_0 – приведённая площадь забоя скважины, м²; $F_{кп}$ – площадь сечения кольцевого пространства между стенками скважины и трубами, м²; K_0 – разность удельных весов раствора, заканчиваемого в скважину γ_{1p} , и раствора (жидкости), выносящего продукт разрушения из скважины γ_{2p} .

1.3 Пневматический способ удаления бурового шлама

Для удаления продуктов разрушения в некоторых случаях применяется вместо промывки продувка скважин сжатым воздухом или газом. Применение газообразных агентов, как показывает отечественная и зарубежная практика, в определённых условиях более целесообразно, чем бурение с использованием промывочной жидкости. При этом возможно осуществлять бурение как сплошным забоем, так и кольцевым (дробью, твёрдыми сплавами и алмазами).

Пневматический способ удаления продуктов разрушения заключается в том, что воздух или газ с помощью компрессора нагнетается к забою скважины и, двигаясь с большой скоростью, захватывает частицы разрушенной породы и выносит их в шламовую трубу и на поверхность. Так же, как и при бурении с промывкой, в этом случае применяются две схемы продувки – прямая и обратная. Наиболее распространённой является прямая схема. Отличительной особенностью

рассматриваемого способа является то, что циркулирующий агент (воздух или газ), имея большую подвижность, интенсивней очищает забой от частиц и, расширяясь при выходе из бурового снаряда в скважину, эффективно охлаждает забойный инструмент. На рисунке 6 представлена схема прямой циркуляции воздуха в скважине. Компрессором через ресивер и влагоотделитель воздух по трубам, напорному шлангу и штангам подаётся к забою. Выходя из коронки, воздух резко расширяется, за счёт чего понижается его температура. Это приводит к охлаждению коронки, а поток воздуха поднимает продукты разрушения в шламовую трубу и по стволу скважины на поверхность. Для улавливания шлама, а также во избежание загрязнения атмосферы вокруг буровой на конце трубы устанавливаются шламоочистители циклонного типа или отсасывающий вентилятор.

Основные преимущества пневматического способа транспортирования продуктов разрушения из скважины заключается в следующем: увеличивается механическая скорость бурения; увеличивается проходка на коронку (долото) и снижается расход забойных инструментов; улучшаются условия изучения геологического разреза по шламу; улучшаются условия бурения в зонах интенсивного или полного поглощения промывочной жидкости; устраняется отдача водо-, нефте- или газосодержащих продуктивных пластов; обеспечивается возможность бурения в условиях многолетней мерзлоты и во льдах; улучшается организация работ зимой и в безводных районах; улучшаются условия работы буровой бригады; в некоторых случаях снижается стоимость бурения скважин.

Повышение эффективности бурения скважин с продувкой воздухом объясняется влиянием целого ряда факторов. Прежде всего положительно сказывается отсутствие или резкое снижение гидростатического давления столба жидкости на породы забоя. Давление на забой при бурении с продувкой небольшое. Это облегчает разрушение пород забойным инструментом, так как разрушение пород, в условиях всестороннего сжатия, которое бывает при бурении с промывкой, всегда менее эффективно. Это сказывается особенно заметно при бурении с промывкой глинистым раствором, который может иметь значительный удельный вес и образует фильтрационную глинистую корку на поверхности разрушаемой породы, которая также снижает эффективность разрушения породы на забое. Уменьшение удельного веса раствора, как отмечалось ранее, приводит к увеличению механической скорости бурения.

Вторым важным фактором является улучшение условий очистки забоя от шлама за счёт более высоких скоростей движения воздуха и образования вихревых потоков в затрубном пространстве. Наконец, увеличение эффективности бурения с продувкой сжатым воздухом или газом связывают с лучшим охлаждением забойного инструмента и отсутствием влаги на забое. Увлажнённые породы разрушаются хуже.

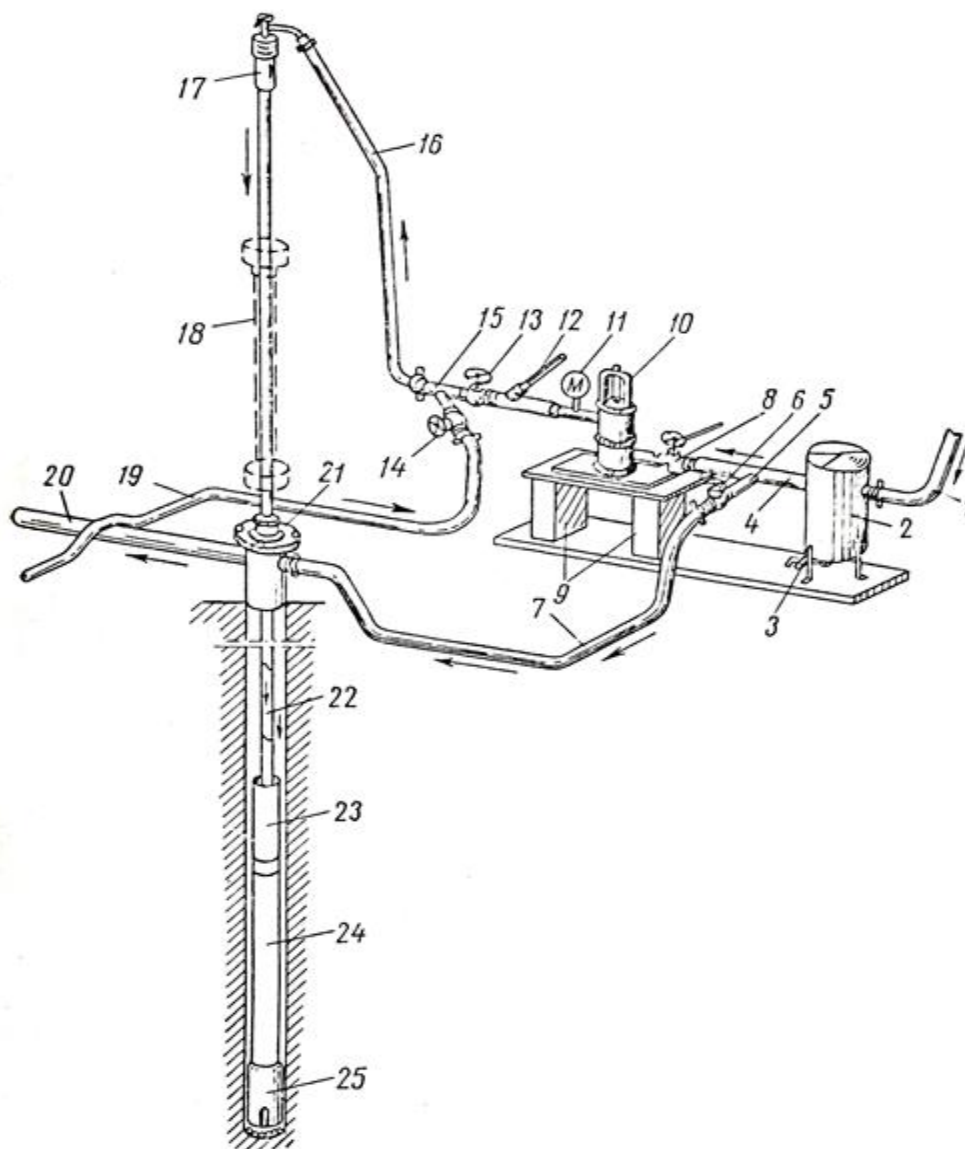


Рисунок 6 – Схема циркуляционной системы при транспортировании продуктов разрушения сжатым воздухом:

1 – труба от компрессора; 2 –масло-влагодотделитель; 3 – спускной кран; 4, 5 – нагнетательный трубопровод; 6 – вентиль; 7 – шланг нагнетательный; 8 – вентиль; 9 – фундамент; 10 – воздухомер; 11 – манометр; 12 – термометр; 13, 14 – вентили; 15 – тройник для подачи промывочной жидкости; 16 – нагнетательный шланг; 17 – сальник; 18 – шпindelь станка; 19 – напорный шланг от насоса; 20 – выкидной трубопровод для воздуха со шламом; 21 – герметизирующее устройство; 22 – бурильные трубы; 23 – шламоулавливающая труба; 24 – колонковая труба; 25 – коронка

Улучшение условий геологической документации объясняется возможностью отбора незагрязнённого шлама с забоя. Бурение с промывкой тем более глинистым раствором такой возможности не даёт.

Бурение с продувкой успешно осуществляется в зонах интенсивного или полного поглощения жидкости. Бурение с промывкой в таких условиях сильно осложняется, а подчас и невозможно. При использовании продувки таких осложнений не возникает. Воздух (или газ), проникая по зонам поглощения, выносит туда и частицы шлама, закупоривая каналы. Никаких изменений в породах

стенок скважины при этом не происходит. Стенки скважины не размываются и не теряют устойчивости, что наблюдается при бурении с промывкой за счёт смачивания толщии пород проникающей в них жидкостью. Практика бурения скважин в зонах тектонических нарушений это хорошо подтверждает.

При бурении разведочных скважин на жидкие полезные ископаемые важным вопросом является опробование продуктивных пластов – определение величины притока полезного ископаемого, например воды, в скважину. При бурении с промывкой глинистым раствором получают всегда заниженные данные, так как каналы, по которым поступает полезное ископаемое, закупоривают глинистые частицы. Для восстановления притока (отдачи пласта) прибегают к сложным работам по разглинизации пласта. Бурение с продувкой скважины сжатым воздухом или газом устраняет все эти отрицательные моменты. Отдача продуктивных пластов в этом случае всегда будет выше, чем при бурении с промывкой.

Бурение в условиях вечной мерзлоты с продувкой воздухом или газом также имеет ряд преимуществ перед бурением с промывкой. При этом не нарушается устойчивость стенок скважины, лучше очищается забой от шлама и исключаются другие осложнения. Условием успешного бурения скважин в мёрзлых породах и льдах с продувкой сжатым воздухом или газом является только то, что температура подаваемого в скважину воздуха должна быть близкой к нулю или отрицательной. Однако компрессор обычно подаёт воздух с положительной температурой и с содержанием паров воды и масел. Проходя по колонне бурильных труб и в скважине, воздух охлаждается и из него выделяются капельки влаги. Если глубина скважины небольшая, то влага стекает к забою, смачивая керн, шлам и стенки скважины, что приводит к их оттаиванию, а это вызывает серьёзные осложнения. При глубине скважины более 100 м влага не достигает забоя и замерзает в бурильных трубах и соединениях, а это приводит к закупорке труб и прекращению циркуляции воздуха. Для устранения этих явлений воздух должен хорошо очищаться от влаги и масел с помощью влагоотделителей (поверхностных и забойных), а в летнее время предварительно охлаждаться в специальных холодильных установках. Это делается в зимнее время при пропускании воздуха по длинной воздухопроводной сети или через холодильники батарейного типа [5,6].

Применение пневматического способа удаления продуктов разрушения из скважин в значительной степени упрощает организацию работ, в особенности в зимнее время и в безводных районах, так как при этом исключается необходимость в организации доставки воды или глинистого раствора, сооружении глиностанции и циркуляционной системы и др. Улучшаются при этом и условия труда буровой бригады: чище рабочее место, работа с сухими трубами, что особенно благоприятно в зимних условиях, когда работа с промывкой может оказаться и небезопасной при обледенении пола буровой.

Наконец, применение пневматического способа приводит в большинстве случаев к снижению стоимости буровых работ. Стоимость бурения 1 м скважины в этом случае, как правило, снижается в 1,5 – 2 раза. Это происходит за счёт увеличения скорости бурения, увеличения проходки за рейс, уменьшения расхода

забойного инструмента, сокращения объёма монтажных работ, устранения расходов на водо- или глиноснабжение и др.

Наряду с отмеченными преимуществами пневматический способ удаления продуктов разрушения на скважины имеет и ряд недостатков. Прежде всего этот способ не может применяться при бурении в сложных геологических условиях: в неустойчивых породах (песках, плывунах, галечниках и др.) и при значительном притоке воды в скважину. Кроме того, при бурении с продувкой уменьшается процент выхода керна (по трещиноватым породам), увеличивается износ бурильных труб, усилие на подъём инструмента и искривление скважин.

Эти недостатки, естественно, ограничивают область применения пневматического способа удаления продуктов разрушения из скважин.

Приток жидкости в скважину вызывает ряд осложнений. При бурении по вязким, липким породам в случае слабого водопритока (до 4 – 5 л/мин) увлажнённый шлам налипает на стенках скважины, на бурильных трубах и на замковых соединениях, что приводит к сужению ствола скважины и серьёзным авариям. При значительном притоке жидкости (от 4 до 60 л/мин) затрудняется удаление её из скважины, увеличиваются расход воздуха или газа, а также давление, развиваемое компрессором.

Для создания благоприятных условий бурения в обводнённых скважинах прежде всего необходимо подбирать рациональный расход воздуха с таким расчётом, чтобы на забое всегда находился столб жидкости 10 – 15 м, и использовать шламовые трубы. При высоте столба жидкости над забоем 20 – 50 м расход воздуха рекомендуется увеличивать на 10 – 40 % против нормального (по данным П.М. Степанова). При высоком уровне жидкости в скважине и малом притоке прибегают к периодическим откачкам (понижением уровня) с помощью желонки. В противном случае бурение можно осуществлять только с промывкой. Поэтому в ряде случаев прибегают к комбинированному удалению шлама, когда это рационально, с помощью сжатого воздуха или с помощью промывки. Для таких случаев на буровой монтируется компрессор и насос.

Удаление сальников иногда осуществляется периодической промывкой скважины. Для предупреждения сальникообразования к жидкости в скважине слипанию частиц шлама. Если образование сальников не предупреждается, то бурение ведётся укороченными рейсами. В противном случае снаряд может быть не поднят из скважины.

В качестве добавок, устраняющих налипание выбуренных частиц, рекомендуется применять неионогенные ПАВ (поверхностно-активные вещества) ОП-7 и ОП-10, которые активно действуют даже в сильно минеральных водах (с содержанием до 10% NaCl или CaCl₂). При отсутствии частиц пород, адсорбирующих ПАВ, концентрация последних составляет всего 0,2%. В противном случае она увеличивается. При притоке вод, содержащих NaCl не более 4%, рекомендуются анионоактивные ПАВ типа «Прогресс» в количестве до 0,6% при содержании в них активного продукта около 20%.

При значительных водопритоках (более 60 л/мин) применение пневматического способа транспортирования продуктов разрушения становится нерациональным. В таких условиях прибегают к гидравлическому способу

(промывка водой или аэрированной жидкостью) или комбинированным способом (пульсирующая или эрлифтная промывка).

При бурении с продувкой, как показывает опыт работ, происходит более интенсивное искривление скважин, особенно в сложных геологических условиях. В таблице 2 приведены данные, характеризующие это явление (по данным Б.Б. Кудряшова и А.И. Кирсанова) в условиях СЗГУ.

Таблица 2 – Зависимость искривления скважин от промывочного агента

Показатели	Скважина		
	1	2	3
Промывочный агент	воздух	вода	вода
Глубина скважины, м	200	225	189
Начальный угол заложения, градус	80	86	84,5
Конечный угол наклона, градус: проектный фактический			
	64	68	69
	44	56	56

Поэтому при бурении с продувкой воздухом или газом необходимо прибегать к мерам предупреждения искривления

Таким образом, с учётом перечисленных достоинств и недостатков разрушения из скважин этот способ может осуществляться эффективно только в определённых условиях: в необводнённых (сухих) разрезах; в зонах сильного поглощения промывочной жидкости; в крепких обводнённых породах, не дающих липких частиц; в зонах многолетней мерзлоты или по льду.

Бурение в разрезах, сложенных сыпучими или обваливающимися породами, с продувкой воздухом возможно только на соответствующих режимах, специально подбираемых для таких условий (пониженное число оборотов, применение гладкостенной колонны буровых труб, менее интенсивное движение воздуха и др.).

Бурение вязких (липких) пород в обводнённых условиях возможно осуществлять только при использовании добавок (веществ), уменьшающих липкость частиц или с аэрированной промывочной жидкостью (с добавкой пенообразователей). Бурение по увлажнённым вязким (липким) глинам, в плывунах и песчано-галечниковых образованиях с продувкой воздухом практически нецелесообразно.

Эффективность удаления продуктов разрушения из скважины зависит главным образом от скорости движения восходящего потока воздуха в циркуляционной системе скважины. Эта скорость должна быть больше некоторой критической величины, или скорости витания частиц. Условие выноса частиц разрушенной породы из скважины может быть выражено уравнением

$$v_{\text{вп}} = v_{\text{кр}} + v_{\text{в}}, \quad (46)$$

где $v_{\text{вп}}$ – скорость восходящего потока воздуха, м/с; $v_{\text{кр}}$ – критическая скорость потока, м/с; $v_{\text{в}}$ – желаемая скорость выноса частиц шлама, м/с.

По данным ВИТР и других исследователей величина желаемой скорости выноса v_v частиц должна быть в пределах 10—30% от величины критической скорости $v_{кр}$. Чем глубже скважина и больше механическая скорость бурения, тем больше должно быть значение скорости выноса частиц.

Критической скоростью потока, или скоростью витания частиц, называют такую скорость восходящего потока, при которой эти частицы находятся во взвешенном состоянии и не перемещаются вдоль оси скважины. Величина критической скорости зависит от многих факторов: формы и характера поверхности, размеров и удельного веса частиц шлама, плотности, температуры, влажности и условий движения сжатого воздуха, характера поверхности стенок скважины, стесненности потока и др. Большинство этих факторов определяется типом породоразрушающего инструмента, режимом его работы, состоянием воздуха, захватываемого компрессором и т. д. Все это в значительной степени усложняет вопрос определения критической скорости. Поэтому в приводимых многими авторами формулах для определения критической скорости восходящего потока делается много допущений и не учитывается целый ряд из перечисленных факторов.

В таблице 3 приводятся наиболее распространенные формулы предложенные различными авторами для определения критической скорости восходящего потока и результаты вычислений, полученные по этим формулам И. П. Елмановым [5].

Исследованиями И. П. Елманова [5] установлено, что при бурении кольцевым и сплошным забоем различными типами породоразрушающих инструментов на разных режимах форма частиц породы в большинстве случаев (94—96%) близка к шарообразной и только 10% из них имеют размер 3 мм и более. Кроме того, было выявлено, что при $v_{вп} = 8 \div 10$ м/с в шламовой трубе оседало 15—20% вес. шлама, а при $v_{вп} = 11 \div 13$ м/с только 2 – 3 % наиболее крупных частиц, минералов, имеющих наибольший удельный вес (ильменит, оливин, пирит, алмаз). Поэтому для бурения разведочных скважин средней глубины (500-600 м) И.П. Улмановым и рядом других исследователей рекомендуется скорость восходящего потока в пределах 11-13 м/с. Наиболее близкие к этому значения дают формулы А.З. Романова, П.Р. Риттингера и Б.М. Мухолова (таблица 3). Для скважин глубиной 1000 м и более при механической скорости бурения более 20 м/ч, когда формируются частицы шлама размером 7-12 мм или при удельном весе породы более 2,5-2,7, многими исследователями рекомендуется увеличивать скорость восходящего потока до 15-25 м/с.

Необходимая скорость восходящего потока при бурении скважин обеспечивается соответствующим расходом воздуха в кольцевом пространстве между бурильными трубами и стенкам скважины, что зависит, в свою очередь, от производительности применяемого компрессора. Известно, что подъёмная способность потока воздуха пропорциональна его плотности и квадрату скорости, т. е.

$$F = C\rho v_{вп}^2, \quad (47)$$

где C – постоянная величина; ρ – плотность воздуха; $v_{вп}$ – скорость восходящего потока, м/с.

Таблица 3 – Определение критической скорости восходящего потока

Афтор формулы	Расчётная формула критической скорости потока	Расчётная величина критической скорости $v_{кр}$, м/с			Расчётная величина скорости восходящего потока $v_{вп}$, при $v_{в} = 10\%$ от $v_{кр}$, м/с		
		при диаметре частиц шлама, мм					
		1,0	2,0	4,0	1,0	2,0	4,0
К.М. Гринёв и др.	$v_{кр} = 4,8\sqrt{d_{ш}\gamma_{п}}$, м/с	7,6	10,7	15,2	8,35	11,8	16,7
Б.Б. Кудряшов	$v_{кр} = \frac{R}{6,38}$, см/с	6,5	11,0	16,0	7,1	12,1	17,6
С.К. Эйфиль	$v_{кр} = 2,16 * 10^{\frac{3}{r}}$, см/с	8,0	10,0	15,0	8,8	11,0	16,5
Б.М. Мухолов	$v_{кр} = 0,17 \sqrt{d_{ш} \frac{\gamma_{п}}{\gamma}}$, см/с	7,2	10,1	14,4	7,9	11,1	15,8
В.А. Успенский	$v_{кр} = 5,57 \sqrt{\frac{d_{ш}\gamma_{п} - \gamma_{в}}{\gamma_{в}}}$, м/с	5,6	11,1	15,6	6,1	12,2	17,2
П.Р. Риттингер	$v_{кр} = \sqrt{\frac{2gd_{ш}\gamma_{п}}{3\phi\gamma_{в}}}$, м/с	5,0	7,02	10,0	5,5	7,7	11,0
А.З. Романов и др.	$v_{кр} = 3,33\sqrt{a_{ш}\gamma_{п}}$, м/с	5,25	7,45	10,5	5,8	8,2	11,5
К.М. Никольсон	$v_{кр} = 2,67 \sqrt{\frac{d_{ш}\rho_{ш}}{\rho_{в}}}$, м/с	3,9	5,6	7,8	4,3	6,2	8,6

где $d_{ш}$ – диаметр частиц шлама, мм; $\gamma_{п}$ – удельный вес горных пород, кгс/см³; $\gamma_{см}$ – удельный вес смеси шлама и воздуха, кгс/см³; $\gamma_{в}$ – удельный вес воздуха, кгс/см³; R – газовая постоянная, кгс*м/кг*°С; r – радиус частиц шлама, см; ϕ – коэффициент формы частиц шлама; g – ускорение свободно падающего тела, м/с².

Учитывая, что величина плотности воздуха и скорости его движения в скважине существенно меняется в зависимости от температуры, давления и других факторов, определение расхода воздуха представляется довольно сложным. Приведенные в литературе формулы и графики для этой цели дают существенно различные результаты, отличающиеся более чем в два раза от 5,3 до 13,9 м³/мин (по расчетам И. П. Елманова) для одних и тех же условий. При этом установлено, что бурение с увеличенным расходом воздуха не только не приводит к росту эффективности процесса, но ухудшает ряд показателей, так как происходит увеличение давления в нагнетательной линии, что в свою очередь влечет за собой увеличение нагрузки на компрессор, повышение температуры сжатого воздуха, расхода мощности, износ шлангов и сальников, наконец, нарушается температурный режим в скважине, что вызывает разрушение стенок при бурении в условиях мерзлых пород. Пониженный (против оптимального) расход воздуха ведет зашламованию скважин, снижению механической скорости бурения. Поэтому весьма важно подобрать такую формулу, которая для конкретных геолого-технических условий давала бы наиболее оптимальные значения расхода воздуха. Так, для условий бурения скважин, приведенных в работе И. П. Елманова [5], при бурении в песчаниках, углистых сланцах и других мерзлых породах удельным весом $\gamma = 2,6 \div 3,0$ шарошечными долотами оптимальное значение расхода воздуха дает формула Р. Р. Энджела

$$Q = F_{\text{кп}} v_{\text{вп}} + \xi H, \quad (48)$$

где Q – расход воздуха при нормальных условиях (температура - 0°, давление 1,033 кгс/см²), м³/мин; $F_{\text{кп}}$ – площадь сечения кольцевого пространства между бурильными трубами и стенками скважины, м²; $v_{\text{вп}}$ – скорость восходящего потока воздуха, м/мин; ξ – коэффициент, учитывающий концентрацию шлама в восходящем потоке воздуха, значения которого приведены в таблице 4; H – глубина скважины, тыс. м.

Для определения расхода воздуха при бурении скважин колонковым способом в тех же условиях И.П. Елманов рекомендует применять формулу Н.С. Макурина

$$Q = 47,1 K_1 (D^2 - d_{\text{нт}}^2) v_{\text{вп}}, \quad (49)$$

Таблица 4 – Значения коэффициента ξ

Диаметр забойного инструмента, мм	Диаметр бурильных труб, мм	Площадь кольцевого зазора, м ²	Значение коэффициента ξ при $v_{\text{вп}} = 12$ м/с и механической скорости бурения, м/ч		
			5,0	10,0	15,0
152	50,0	0,0157	2,81	3,23	3,37
	63,5	0,0146	2,7	3,12	3,25
132	50,0	0,0115	2,41	2,82	3,00
	63,5	0,0103	2,3	2,31	2,92
112	50,0	0,077	2,06	2,45	2,7
	63,5	0,0065	1,94	2,34	2,6
92	50,0	0,047	1,66	2,07	2,38
	63,5	0,0035	1,57	1,96	2,26

где Q – расход воздуха при нормальных условиях, м³/мин; D – диаметр скважины с учётом её разработки, м; $d_{\text{нт}}$ – наружный диаметр бурильных труб, м; $v_{\text{вп}}$ – скорость восходящего потока воздуха, м/с; K_1 – коэффициент, учитывающий давление воздуха в кольцевом пространстве у колонкового снаряда.

1.4 Шнекопневматический способ удаления бурового шлама

В связи с тем, что долота ДЗДШ как разновидность режущего бурового инструмента на шкале крепости буриемых пород занимают промежуточное положение между шарошечными и режущими долотами, а конструктивно от упомянутых долот отличаются возможностью бурения скважин в сложноструктурных обводненных и глинистых породах, целесообразно рассмотреть вопрос об их применении со шнекопневматической очисткой, которая в указанных условиях является наиболее эффективной по сравнению с другими видами шламоудаления.

Впервые отечественные эксперименты шнековоздушной очистки скважин от бурового шлама были проведены на разрезе «Ирша-Бородинский» при непосредственном участии и под научным руководством одного из авторов данной книги. Для экспериментального бурения скважин применили шарошечный станок

СВБК-200, оборудованный как шнековыми, так и гладкоствольными штангами для продувки сжатым воздухом [7]. Были испытаны различные конструкции шарошечных и режущих долот (типа ДЗДШ и ДР) диаметром 190–214 мм при различных комбинациях способов очистки скважин и подачи сжатого воздуха.

Наиболее рациональным (по скорости и удельной энергоемкости бурения) оказался предложенный НИИОГРом комбинированный шнековоздушный способ очистки скважин с помощью специальных шнеков диаметром 190 мм, имеющих продувочный канал и резьбовые соединения. Однако исследование режимов шламоудаления, влияния конструктивных параметров и аэродинамических характеристик долот ДЗДШ на процесс шнековоздушной очистки скважины от бурового шлама в работе [7] не рассмотрено.

В дальнейшем изучение бурения скважин со шнекопневматическим способом очистки от бурового шлама получило развитие и промышленное внедрение в Кузбасском государственном техническом университете под научным руководством проф. Б.А. Катанова [8].

Шнекопневматический способ очистки скважин от бурового шлама позволяет наиболее полно использовать преимущества как шнековой, так и пневматической очистки: частицы большого размера в основном транспортируются шнеком, мелкие – сжатым воздухом.

По условиям транспортирования бурового шлама, как отмечено в работе [8], скважина может быть разделена на два участка. Длина первого участка (от забоя до первого витка спирали шнека) зависит в основном от высоты долота, т.е. от его конструкции. Длина второго участка (от первого витка спирали шнека до устья скважины) определяется глубиной бурения.

Закономерности движения частиц при шнекопневматической очистке на первом участке скважины (призабойной зоны) во многом аналогичны очистке сжатым воздухом. Следовательно, эти закономерности для долот ДЗДШ также, как и при пневмоочистке, будут, кроме прочих, определяться конструктивными и аэродинамическими параметрами долот. Рассмотрим особенности шнекопневматической очистки при бурении скважин долотами ДЗДШ на станках СБШ или СВБ–200/250, рекомендованных в работе [9], специально для этого способа очистки скважин от бурового шлама.

При шнекопневматической очистке выдача частиц бурового шлама из призабойной зоны скважины на первый виток шнека в основном осуществляется потоком сжатого воздуха. Частица бурового шлама при разрушении породы долотом приобретает два вида движения: поступательное вверх (относительное) и вращательное (переносное) в продувочных окнах долота.

Относительное движение частиц происходит под действием ряда сил: силы веса G_i (рисунок 7) [8]; силы трения частицы о поверхность зубчато-дисковой шарошки F_1 ; реакций N_1 и N_2 , направленных перпендикулярно поверхности зубчато-дисковой шарошки и забоя; силы трения частицы о забой скважины F_2 , направленной противоположно абсолютной скорости частицы V_a ; силы давления воздушного потока $M_{пр}$, обусловленной скоростью воздуха в призабойной зоне $V_{пр}$. Следует отметить, что на частицу также действует подъемная сила, обусловленная вращением зубчато-дисковой шарошкой с $V_{окр}$.

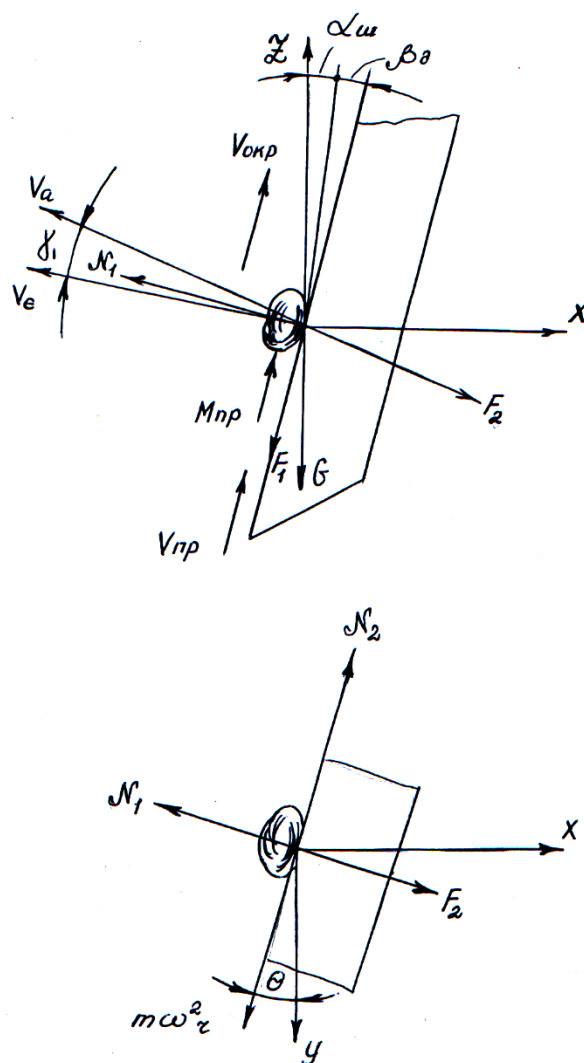


Рисунок 7 - Схема сил, действующих на частицу бурового шлама в призабойной зоне скважины

Силу давления воздушного потока $M_{пр}$ Б.А. Катанов в работе [8] определил по формуле

$$M_{пр} = \frac{1,5 * \psi * \rho_{в} * m * k * V_{пр}^2}{d * \rho_n * c_1^2}, \quad (50)$$

где ψ – коэффициент обтекания частицы бурового шлама потоком сжатого воздуха; $\rho_{в}$ – плотность воздуха в призабойной зоне, кг/м³; m – масса частицы, кг; k – коэффициент, учитывающий уменьшение силы давления воздушного потока при движении частицы бурового шлама относительно долота, $k=0,9-0,95$; $V_{пр}$ – скорость воздушного потока, м/с; C_1 – коэффициент, зависящий от формы и размеров частицы (в работе [8] принято $C_1 = 0,9$); d – диаметр частицы бурового шлама, м.

Аэродинамические характеристики бурового инструмента обуславливают следующие параметры: конструктивные параметры долота, как его диаметр, ширина и число породоразрушающих элементов, установленных на долоте; определяемые коэффициентом относительной ширины продувных окон k_0 (51) и

коэффициентом отношения площадей сечений призабойной зоны и затрубного пространства a (52).

$$k_o = (\pi D - \beta h_d \cdot k_1) / \beta / (\pi D) = (\pi D - \beta h_d \cdot k_1) / (\beta \cdot \pi D)$$

или

$$k_o = 1 / \beta - h_d \cdot k_1 / (\pi D). \quad (51)$$

$$a = S_{\text{приз}} / S_{\text{затр}} = (D - D_K) / 2 \cdot [\pi(D + D_K) / 2 - h_d \cdot \beta \cdot k_1] \cdot k_2 / [\pi(D^2 - D_{\text{ш}}^2) / 4] = 2(D - D_K) \cdot [\pi(D + D_K) / 2 - h_d \cdot \beta \cdot k_1] \cdot k_2 / \pi(D^2 - D_{\text{ш}}^2). \quad (52)$$

Влияние коэффициентов k_o и a на скорость воздуха в призабойной зоне можно установить, выполнив анализ формул (53) и (54), из которых следует, что зависимость $V_{\text{пр}}$ от k_o и a можно выразить через интегральный аэродинамический показатель k_3 . Нами предлагается определять его с помощью выражения

$$V_{\text{прогн}}^3 = A_2 \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^{m-5} \cdot \exp \left[- \left(\frac{n \cdot d}{A \cdot V_n} \right)^m \right] \times \times \left\{ \exp \left[-9 + \sqrt{457.8 + 17.7 \ln(d^3 \cdot \rho)} \right] \right\}^3 \cdot d(d), \quad (53)$$

где

$$A_2 = [1.5 \cdot D^2 \cdot m \cdot n^m \cdot a^{-1} \cdot A^{-m} \cdot V_n^{1-m} / (D^2 - D_{\text{ш}}^2)] \times \times \left\{ 15 \cdot 10^{-6} \cdot k_c \cdot k_{\phi} \sqrt{(1 + \Delta p) \cdot [1 + 2L \cdot n^2 (1 - c)^2] / (g \cdot k_0^2)} \right\}^3 \quad (54)$$

$$k_3 = k_c \cdot a^{-0.333} \cdot \sqrt{1 + \frac{0.1}{k_0^2}}, \quad (55)$$

где k_c – коэффициент, учитывающий стесненность движения частиц в воздушном потоке; a – коэффициент отношения площадей сечений призабойной зоны $S_{\text{пр}}$ и межвиткового пространства шнека $S_{\text{шн}}$,

$$a = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{шн}}}, \quad (56)$$

где $S_{\text{пр}}$ определяется по формуле (57), $S_{\text{шн}}$ – по формуле

$$S_{\text{приз}} = [\pi(D^2 - D_K^2) / 4 - h_d \cdot (D - D_K) \cdot \beta \cdot k_1 / 2] \cdot k_2. \quad (57)$$

$$S_{\text{шн}} = \frac{\Pi}{4} (D^2 - d_B^2) - S_c, \quad (58)$$

где d_b – диаметр бурильной трубы, м; S_c – площадь сечения спирали шнека, m^2 ,

$$S_c = (D_{ш} - d_b)h_b, \quad (59)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шнека, м; h_b – толщина спирали шнека, м.

Рассмотрим влияние k_0 на параметры сжатого воздуха при работе долот ДЗДШ со шнекопневматической очисткой.

При решении уравнения движения частицы бурового шлама под действием сил, показанных на рисунке 7, Б.А. Катановым была получена формула, позволяющая определить скорость воздушного потока, необходимую для своевременного выноса частицы бурового шлама от забоя на шнек, которая, с учетом выражения (55) принимает вид

$$V_{пр} = k_c * a^{-0.333} \sqrt{\frac{d * \rho_{п} * c_1^2}{1.5 * \psi * \rho_b * k} * \left(1 + \frac{0,1}{k_0^2}\right) \times} \\ \times \sqrt{\frac{2 * L * \cos \beta_d}{T^2} + g[f_1 * \sin(\alpha_c + \beta_d) + \cos(\alpha_c + \beta_d)] + f_2 * \bar{\omega}^2 * r(\beta_d - \gamma_1) - \sin(\beta_d - \gamma_1)}, \quad (60)$$

где L – высота призабойной зоны, равная высоте корпуса долота, м; β_d – угол наклона породоразрушающего элемента к плоскости забоя; α_c – угол наклона буримой скважины к вертикали, град; f_1, f_2 – коэффициенты трения частицы бурового шлама, соответственно, о породоразрушающий элемент и стенку скважины ($f_1 = 0,52$ и $f_2 = 0,9$); g – ускорение свободного падения частицы бурового шлама, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; T – время движения частицы от забоя до шнека в продувочных окнах долота, с [10],

$$T \leq \frac{k_0}{n_b(1 - c)}, \quad (61)$$

где n_b – частота вращения долота, c^{-1} ; ω – скорость вращения частиц, c^{-1} , $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_b$; r – радиус вращения частицы, который можно принять равным половине диаметра шнека, м; γ_1 – угол между векторами абсолютной (V_a) и переносной (V_e) скорости частицы, град,

$$tg \gamma_1 = \frac{L * \cos \beta_d}{\varphi * r + H * \sin \beta_2}, \quad (62)$$

где φ – угол поворота долота за время движения частицы от забоя до шнека [10],

$$\varphi = 2 * \pi * n_b * T. \quad (63)$$

Определим коэффициент обтекания частицы бурового шлама пластинчатой формы потоком воздуха [11]:

$$\psi = 2.454 * \nu^{0.138}, \quad (64)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха.

При температуре воздуха 20 °C $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда

$$\psi = 2.454 * (15.7 * 10^{-6})^{0.138} = 0.57$$

Плотность воздуха в призабойной зоне найдем по выражению [12]

$$\rho_v = \frac{P_{пр}}{R * T}, \text{ кг/м}^3, \quad (65)$$

где R – газовая постоянная, $R = 287$ Дж/кг; T – температура сжатого воздуха в призабойной зоне, $T = 293$ К; p_v – давление воздуха в призабойной зоне скважины, Па,

$$P_{пр} = P_k - \Delta P_3, \quad (66)$$

где P_k – давление воздуха, подаваемого компрессором, принятое по рекомендациям работы [9], $P_k = 0,6$ МПа; ΔP_3 – потери давления воздуха от компрессора до забоя, МПа,

$$\Delta P_3 = \Delta P_d + P_{ш}, \quad (68)$$

где ΔP_d – потери давления в долоте, МПа; $P_{ш}$ – потери давления в буровом ставе [10],

$$P_{ш} = 0,5 * \lambda_{ш} * \rho_{ш} * L_{ш} * \nu_{ш}^2 / d_{вн}, \quad (69)$$

где $\lambda_{ш}$ – коэффициент аэродинамических сопротивлений воздуха в штанге,

$$\lambda_{ш} = 0,11 \sqrt[4]{\frac{h_3}{d_{вн}} + 68/R_e}, \quad (70)$$

где h_3 – эквивалентная шероховатость штанг, $h_3 = (0,0002-0,0007)$, м; $d_{вн}$ – внутренний диаметр штанг, м.

Для штанг с внешним диаметром трубы $d = 0,160$ м, $d_{вн} \approx 0,125$ м, R_e – число Рейнольдса, которое равно

$$R_e = \rho_v * V_{ш} \frac{d_{вн}}{\mu}, \quad (71)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$ Па*с; $V_{ш}$ – скорость воздуха в штанге, м/с,

$$V_{ш} = \frac{F_k}{S_{вн}}, \quad (72)$$

где F_k – предварительно принятый расход воздуха, поступающий в штангу от компрессора, $F_k = 0,16$ м³/с; $S_{вн}$ – площадь внутреннего сечения штанги, м².

В формуле (69) $L_{ш}$ – условная расчетная длина штанг, рассчитываемая по выражению [10]

$$L_{ш} = n_{ш} * \ell_{ш} + d_{вн} * \frac{E_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{(\ell_m + d_m * E_m) d_m^5}{\lambda_m * d_{вн}^5}, \quad (73)$$

где $n_{ш}$ – количество штанг; $\ell_{ш}$ – глубина буримой скважины, м; $d_{вн}$ – внутренний диаметр штанги, м; $E_{ш}$ – суммарный коэффициент местных сопротивлений штанг,

$$E_{ш} = n_{ш} \left[\left(\frac{d_{вн}^2}{d_m^2} - 1 \right)^2 + 0,5 \left(\frac{d_{вн}^4}{d_m^4} \right)^4 * \sqrt{\left(1 - \frac{d_{вн}^2}{d_m^2} \right)^3} \right], \quad (74)$$

где $\lambda_{ш}$ – коэффициент аэродинамических сопротивлений воздуха в штанге; ℓ_m – длина воздушной магистрали пневмотранспортной системы бурового станка, м; d_m – внутренний диаметр воздушной магистрали, м; E_m – коэффициент местных сопротивлений воздушной магистрали.

Исследованиями, проведенными В.А. Перетолчиным [10], установлено, что потери давления воздуха при шнекопневматической очистке скважины от бурового шлама определяются по выражению

$$\Delta P_{общ} = \Delta P_{ш} + \Delta P_d + \Delta P_{скв}, \quad (75)$$

где $\Delta P_{скв}$ – потери давления в скважине.

При этом

$$\Delta P_{ш} : \Delta P_d : \Delta P_{скв} = 1 : 8 : 6,5. \quad (76)$$

Принимая во внимание формулы (5.81) и (5.82), необходимое давление на выходе из компрессора можно принять равным

$$P_k = P_0 + \Delta P_{общ} = P_0 + \Delta P_{ш} + \Delta P_d + P_{скв}, \quad (77)$$

Рассчитанные потери давления позволяют определить давление воздуха в призабойной зоне $P_{пр}$ по формуле (66), его плотность – по формуле (65), которая необходима для расчета скорости воздуха в призабойной зоне $V_{пр}$ по формуле (60). Результаты расчетов $V_{пр}$ представлены на рисунке 8.

На графике видно, что закономерности движения воздуха и зависимости скорости воздуха от конструктивных параметров долот и аэродинамических характеристик в призабойной зоне при шнекопневматической очистке скважины аналогичны закономерностям движения воздуха и зависимости скорости воздуха от указанных параметров при пневмоочистке скважин (рисунок 9).

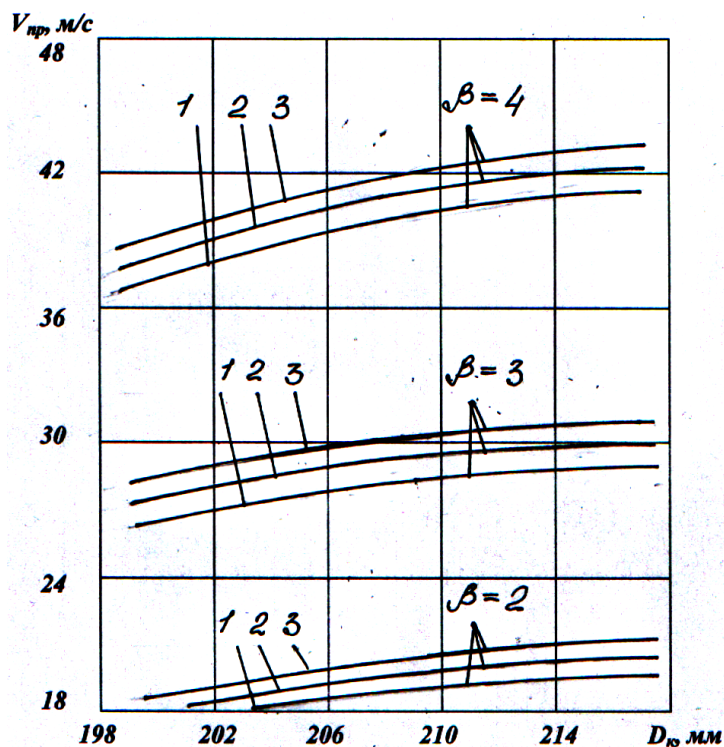


Рисунок 8 - Зависимость скорости воздушного потока для выноса частиц шлама из призабойной зоны от конструктивных параметров долота ДЗДШ при шнекопневматической очистке:

D_k – диаметр корпуса долота; β – количество зубчато-дисковых шарошек: 1 – $h_d = 24$ мм; 2 – $h_d = 28$ мм, 3 – $h_d = 32$ мм

Итак, при увеличении диаметра ДЗДШ, а также ширины и количества зубчато-дисковых шарошек, установленных в его корпусе, происходит повышение скорости воздуха в призабойной зоне.

При шнекопневматическом транспортировании бурового шлама из скважины на частицу действуют такие силы (рисунок 10) [8], как сила веса G , сила трения о виток шнека F_1 и стенку скважины F_2 , сила реакции витка N и сила давления воздушной струи $M_{ш}$.

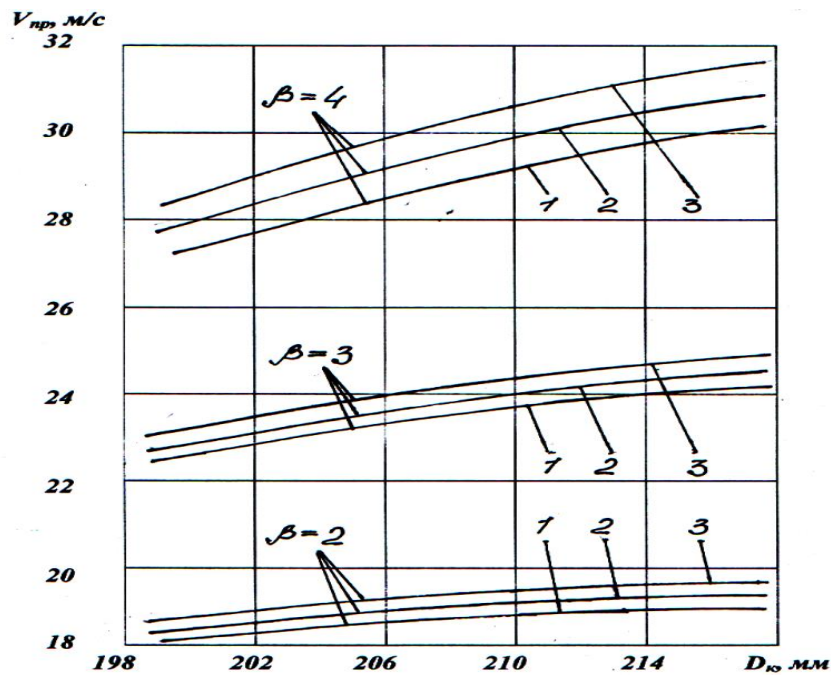


Рисунок 9 - График зависимости скорости воздуха в призабойной зоне от диаметра корпуса D_k , числа β и ширины h_d зубчато-дисковых шарошек:
1 – $h_d = 24$ мм; 2 – $h_d = 28$ мм; 3 – $h_d = 32$ мм

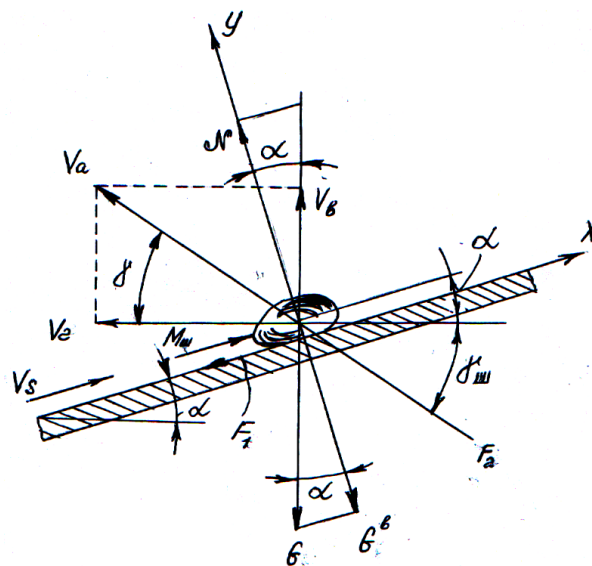


Рисунок 10 - Схема сил, действующих на частицу бурового шлама в шнековой зоне скважин

В первом уравнении сила трения частицы о виток шнека равна

$$F_1 = f_2 * N \quad (79)$$

Во втором уравнении сила трения частицы о стенку скважины равна

$$F_2 = f_1 * m * r * \bar{\omega}_d^2 \quad (80)$$

а сила реакции витка определяется по формуле

$$N = G * \cos \alpha_{\text{ш}} \quad (81)$$

Подставляя выражения (79) – (81) в формулу (78) и суммируя уравнения равновесия, получаем выражение, определяющее силу давления воздушной струи, действующей на частицу:

$$M_{\text{ш}} = m * g(f_2 * \cos \alpha_{\text{ш}} + \sin \alpha_{\text{ш}}) - f_1 * m * r * \bar{\omega}_d^2 [\cos(\alpha_{\text{ш}} + \gamma_{\text{ш}}) - \sin(\alpha_{\text{ш}} + \gamma_{\text{ш}})] \quad (82)$$

Проанализируем уравнение (82). Угол $\gamma_{\text{ш}}$ изменяется от 0° до 180° . Однако при $\gamma \geq 90^\circ$ частица бурового шлама начинает перемещаться без помощи шнека за счет скорости воздушного потока $V_{\text{ш}}$, величина которой, а следовательно, и величина расхода воздуха, становится намного больше необходимой. Поэтому рассмотрим изменение силы давления $M_{\text{ш}}$ при изменении угла между абсолютной и относительной скоростью частицы бурового шлама в пределах $0^\circ < \gamma_{\text{ш}} < 90^\circ$. Зависимость $M_{\text{ш}}$ от угла γ при скорости вращения долота $n_b = 125 \text{ мин}^{-1}$ и различных значениях угла наклона витка спирали шнека $\alpha_{\text{ш}}$ показана на рисунке 11.

На рисунке 11 видно, что сила давления $M_{\text{ш}}$ имеет максимальные значения при $\gamma_{\text{ш}} = 45^\circ$.

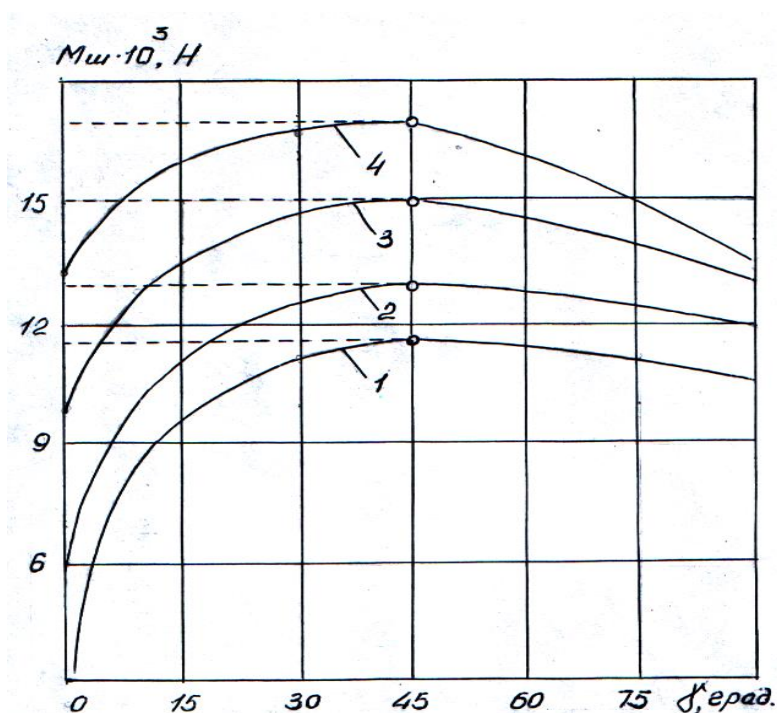


Рисунок 11 - Зависимость силы давления воздушного потока на частицу бурового шлама от угла наклона абсолютной скорости движения к горизонтальной плоскости скважины в процессе шнекопневматической очистки при различных углах наклона витка спирали шнека ($n_d = 125 \text{ мин}^{-1}$):

1 – $\alpha_{\text{ш}} = 15^\circ$; 2 – $\alpha_{\text{ш}} = 24^\circ$; 3 – $\alpha_{\text{ш}} = 35^\circ$; 4 – $\alpha_{\text{ш}} = 45^\circ$

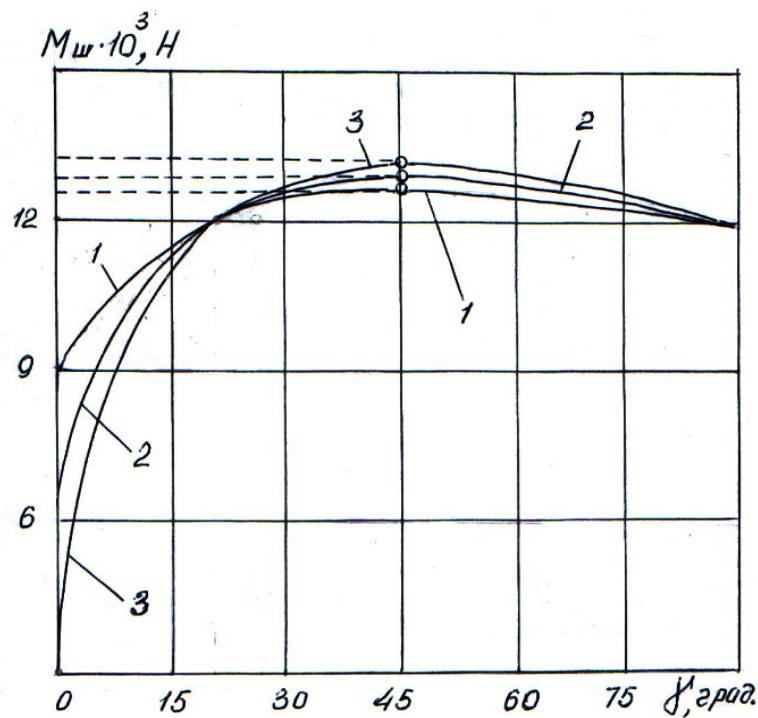


Рисунок 12 - Зависимость силы давления воздушного потока на частицу бурового шлама от угла наклона абсолютной скорости ее движения к горизонтальной плоскости скважины в процессе шнекопневматической очистки при различной скорости вращения долота ДЗДШ ($\alpha_{ш} = 24^\circ$):
 1 – $nd = 90 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $nd = 125 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $nd = 150 \text{ мин}^{-1}$

Угол наклона витка спирали шнека $\alpha_{ш}$ определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha_{ш} = \frac{H}{\pi \cdot D_{ш}}, \quad (83)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шнека, м; H – шаг спирали, м.

При рекомендуемых в работе [9] величинах соотношения шага спирали и диаметра скважины $H/D_c = 1,2\text{--}1,7$ ($H = 0,330 \text{ м}$, $D_c = 0,2445 \text{ м}$) получаем рациональные значения $\alpha_{ш} = 21\text{--}28^\circ$. Приняв среднее значение $\alpha_{ш} = 24^\circ$, рассчитаем $M_{ш}$ для различных значений скорости вращения долота. Из графиков, представленных на рисунках 11 и 12 видно, что сила давления воздушного потока $M_{ш}$ на частицу бурового шлама при всех принятых значениях скорости вращения долота имеет максимальные значения при $\gamma = 45^\circ$ (как и при различных значениях $\alpha_{ш}$).

Анализируя формулу (50) для определения силы давления воздушного потока, действующей на частицу бурового шлама, можно установить следующую зависимость:

$$\frac{M_{пр}}{M_{ш}} = \frac{V_{пр}^2}{V_{ш}^2}$$

откуда

$$V_{ш} = V_{пр} \sqrt{\frac{M_{ш}}{M_{пр}}}, \quad (84)$$

По условиям очистки рациональными являются такие параметры призабойной зоны и затрубного пространства, при которых обеспечивается равенство требуемых расходов:

$$\begin{aligned} F_{пр} &= F_{ш} \\ \text{или} \quad V_{пр} * S_{пр} &= V_{ш} * S_{ш} \end{aligned} \quad (85)$$

Из выражения (85) следует, что скорость воздушного потока в межвитковом пространстве определится по формуле

$$V_{ш} = V_{пр} \frac{S_{пр}}{S_{ш}}, \quad (86)$$

где выражение $S_{пр}/S_{ш}$ можно заменить коэффициентом соотношения площадей $S_{пр}$ и $S_{ш}$, т.е.

$$a = \frac{S_{пр}}{S_{ш}}$$

Тогда

$$V_{ш} = V_{пр} * a, \quad (87)$$

Перемножив уравнения (85) и (87), получим формулу для определения скорости воздуха в межвитковом пространстве шнека:

$$V_{ш} = V_{пр} * \sqrt[4]{a^2 * \frac{M_{ш}}{M_{пр}}}, \quad (88)$$

Приняв максимальное значение силы давления воздушного потока при $\gamma_{ш} = 45^\circ$, действующей на частицу в межвитковом пространстве шнека, $M_{ш} = 13,0 \cdot 10^{-3}$ Н для скорости вращения долота при $n_d = 125$ мин⁻¹, рассчитанной по формуле (82) (рисунок 12), а значения $M_{пр}$ из графиков, представленных на рисунке 13, получим формулы для определения скорости воздуха в межвитковом пространстве шнека:

для двухдискового долота ДЗДШ

$$V_{ш} = (0,75 - 0,77) * \sqrt{a} * V_{пр} \quad (89)$$

для трехдискового долота ДЗДШ

$$V_{ш} = (0,61 - 0,63) * \sqrt{a} * V_{пр} \quad (90)$$

для четырехдискового долота ДЗДШ

$$V_{ш} = (0,53 - 0,55) * \sqrt{a} * V_{пр} \quad (91)$$

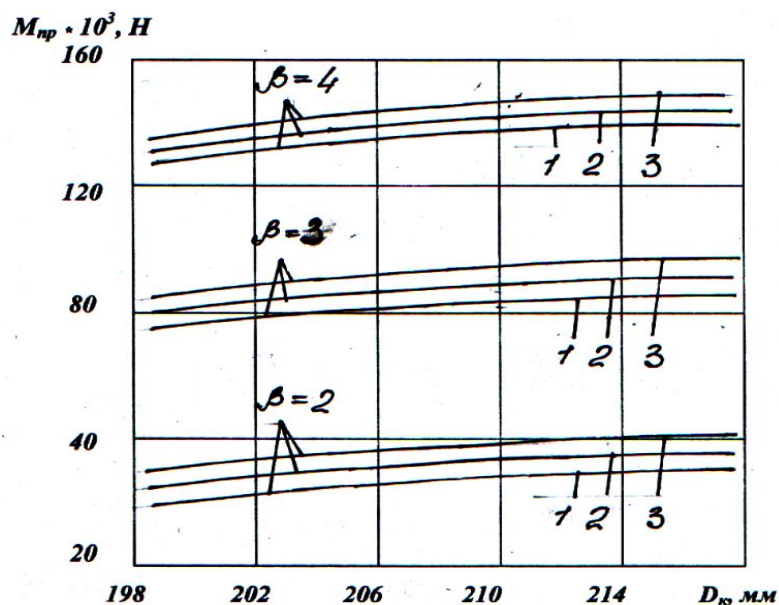


Рисунок 13 - Зависимость силы давления воздушной струи на частицу бурового шлама в призабойной зоне от конструктивных параметров долота ДЗДШ при шнекопневматической очистке скважины:

1 – $h_d = 24$ мм; 2 – $h_d = 28$ мм; 3 – $h_d = 32$ мм; $n_d = 125$ мин⁻¹

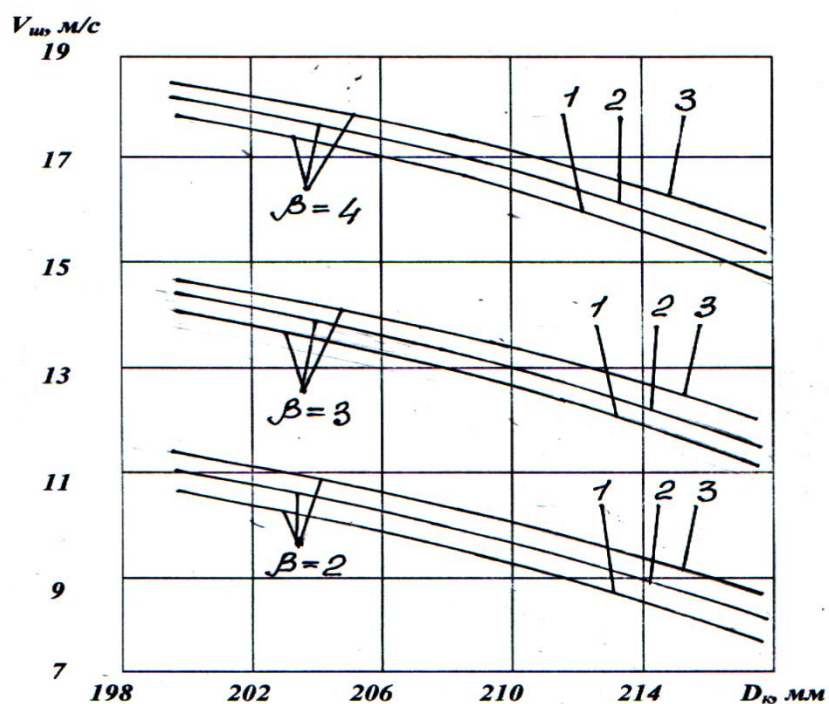


Рисунок 14 - Зависимость скорости воздуха в межвитковом пространстве шнека от конструктивных параметров долот ДЗДШ:

1 – $h_d = 24$ мм; 2 – $h_d = 28$ мм; 3 – $h_d = 32$ мм

Рассчитанные по формулам (89) – (91) средние значения скорости воздуха в межвитковом пространстве шнека представлены на рисунке 14, откуда видно, что она снижается с увеличением диаметра корпуса долота и повышается с увеличением ширины и количества зубчато-дисковых шарошек, установленных в нем. Аналогичным образом можно определить скорость воздуха в межвитковом пространстве и для других значений скорости вращения бурового инструмента и его диаметра.

1.5 Пневмо-жидкостный (эрлифтный) способ удаления бурового шлама

Для удаления продуктов разрушения из скважины может быть использована в определённых условиях эрлифтная система, вызывающая обратную циркуляцию жидкости, широко применяемая для откачек воды из гидрогеологических скважин. При этом может осуществляться схема полной и неполной циркуляции жидкости. В последнем случае используются шламоулавливающие устройства, а полное удаление продуктов разрушения из скважины осуществляется подъёмом снаряда на поверхность (комбинация с механическим удалением). Такая схема промывки особенно эффективна при пересечении скважиной зон поглощения, когда потери промывочной жидкости не позволяют осуществлять полную циркуляцию.

Эрлифтная установка состоит из компрессора, расходомера воздуха с манометром, колонны бурильных труб, по которым нагнетается воздух, воздухоподводящей трубы со смесителем, представляющим собой перфорированную трубу, помещённую внутрь бурильных (водоподъёмных) труб ниже статического уровня жидкости в скважине (рисунок 15). Буровой снаряд имеет обычную конструкцию со шламовой трубой закрытого или открытого типа.

Работа эрлифта заключается в следующем. Воздух, нагнетаемый по бурильным и воздухоподводящим трубам, через отверстия в смесителе (форсунке) поступает в зазор между смесителем и бурильными трубами. Образующаяся здесь водно-воздушная смесь с удельным весом менее единицы поднимается по водоподъёмным трубам и выливается в полость скважины (или в специальный резервуар на поверхности) через сливные отверстия, расположенные выше статического уровня жидкости. Снизу через буровой снаряд, омывая забой и торец коронки, вода поступает в колонну бурильных труб к смесителю. Таким образом создаётся местная обратная циркуляция жидкости. Эрлифтные установки, применяемые при бурении скважин, отличаются друг от друга только конструкцией двойной колонны труб замковых соединений. В практике работ применяются эрлифтные наборы конструкции ВИТР – СЭ-63,5 и НЭ-50П, конструкции треста Кривбассгеология, конструкции СГИ. Глубина бурения при этом достигает 650 м, а расход воздуха составляет 0,5 – 1,5 м³/мин.

Все эрлифтные установки делятся на два типа – изготовленные из труб диаметром 63,5/51,5 мм и больше с металлическими воздухоподающими трубами, размещаемыми внутри бурильных труб (водоподъёмных), и второй тип – из бурильных труб диаметром 50 или 63,5 мм с полиэтиленовыми внутренними трубками. В первом случае применяются специальные быстроразъёмные соединения, а во втором – обычной конструкции.

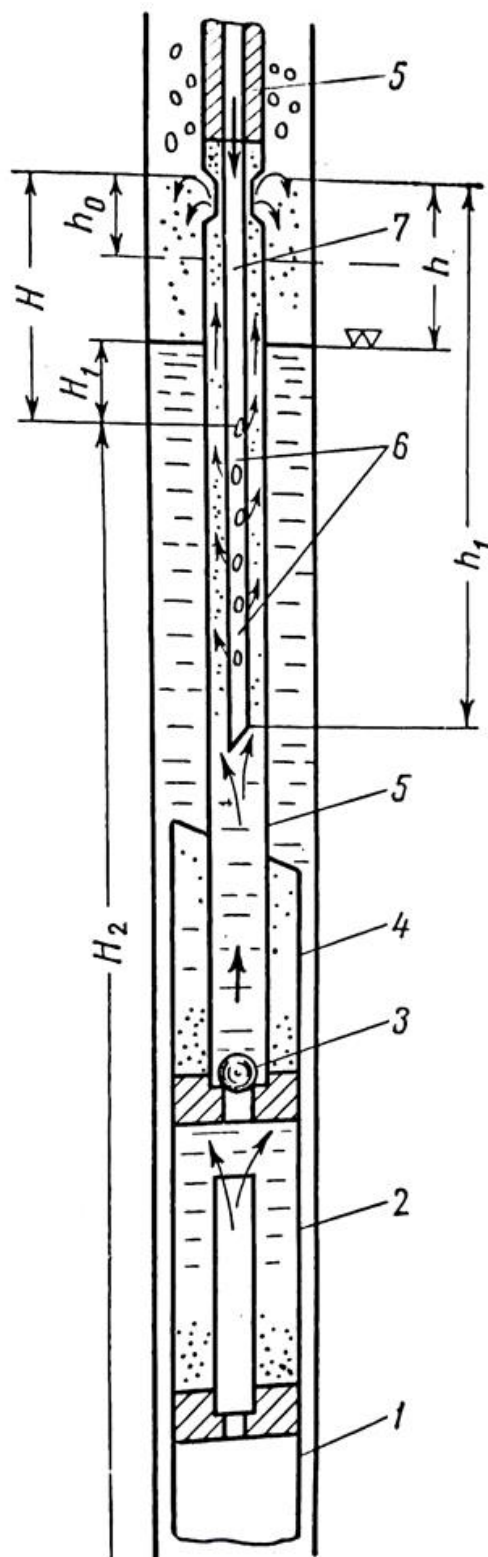


Рисунок 15 – Схема действия эрлифтной установки при обратной призабойной циркуляции жидкости:

- 1 – колонковая труба; 2 – шламоулавливающая труба закрытого типа; 3 – шаровой клапан;
 4 – шламоулавливающая труба; 5 – бурильная труба; 6 – перфорированная труба;
 7 – воздухоподающая труба

Величина гидравлических сопротивлений в бурильных трубах эрлифта и в снаряде должна быть минимальной. По данным ВИТР она не должна превышать

разности $H_1 - 0,45H$, где H_1 – глубина погружения смесителя ниже динамического уровня жидкости; H – длина эрлифтных труб до излива. Это достигается применением бурильных труб и соединений с небольшим внутренним диаметром, коронок с хорошими промывочными каналами и значительным выходом резцов за боковые поверхности. Воздухопроводящая линия должна быть герметичной. Промывочная жидкость при местной циркуляции должна хорошо очищаться от шлама, для чего в снаряд включаются шламовые трубы закрытого и открытого типа. Над шламоприёмником закрытого типа рекомендуется устанавливать шаровой клапан, предохраняющий керн от выдавливания столбом жидкости.

Возможность применения эрлифтной установки для бурения скважин определяется расходом воздуха при заданных геометрических размерах труб, необходимом количестве промывочной жидкости (исходя из условий обеспечения нормального режима бурения) и глубиной скважины при выборе эрлифтной системы промывки скважин можно воспользоваться методикой расчёта эрлифтных установок, применяемых для водоподъёма [13]. Прежде всего определяется расход сжатого воздуха. Подъём воды в эрлифте производит сжатый воздух, совершая полезную работу, величина которой определяется выражением

$$A_1 = \frac{Qh}{\eta_э}, \quad (92)$$

где Q – количество поднятой воды на высоту h , м³/с; $\eta_э$ – гидравлический к.п.д. эрлифтной установки.

Затраченная при этом работа равна энергии сжатого воздуха или работе A , потребной для сжатия объёма воздуха V от начального давления p_1 до конечного p_2 , которая при изометрическом процессе определяется выражением

$$A = p_1 V_1 l_n \frac{p_2}{p_1}, \quad (93)$$

Следовательно,

$$A = A_1 = \frac{Qh}{\eta_э} = p_1 V_1 l_n \frac{p_2}{p_1}, \quad (94)$$

где $p_1 = 10$ тс/м² – начальное абсолютное (атмосферное) давление воздуха; p_2 – конечное абсолютное давление воздуха; V_1 – количество засасываемого компрессором воздуха при атмосферном давлении p_1 , м³/с; Q – количество поднятой воды на высоту h , м³/с; h – глубина динамического уровня от уровня излива, м; $\eta_э$ – гидравлический к.п.д. эрлифта (исключая компрессор); K – коэффициент погружения смесителя эрлифта, определяемый выражением

$$K = \frac{H}{h}, \quad (95)$$

где H – глубина погружения смесителя эрлифта от уровня излива, м.

Заменяя натуральный логарифм десятичным и преобразуя уравнение (94), получаем формулу расхода воздуха V_1 , м³/с:

$$V_1 = \frac{Qh}{\eta_{\text{э}} * 23 * \lg h (K - 1) + 10}, \quad (96)$$

Поделив обе части выражения (96) на Q , можно определить количество воздуха, затрачиваемого на подъём 1 м³ воды, т.е. удельный расход воздуха V_0 , м³/с:

$$V_0 = \frac{h}{\eta_{\text{э}} * 23 * \lg h (K - 1) + 10}, \quad (97)$$

Наконец, расход воздуха при подъёме воды в количестве Q_1 определяется выражением

$$V = Q_1 V_1, \quad (98)$$

Гидравлический коэффициент полезного действия эрлифта может быть определён выражением [13]

$$\eta_{\text{э}} = \frac{(K - 1)^{0,85}}{1,05K}, \quad (99)$$

В таблице 5 приводятся значения к.п.д. эрлифта $\eta_{\text{э}}$ и коэффициента погружения смесителя в зависимости от геодезической высоты подъёма смеси воды и воздуха h (динамического уровня воды в скважине до уровня излива).

Таблица 5 – Значения к.п.д. эрлифта и коэффициента погружения смесителя

Высота подъёма смеси h_1 , м	До 15	15-30	30-60	60-90	90-120
$\eta_{\text{э}}$	0,59-0,57	0,57-0,54	0,54-0,5	0,5-0,41	0,41-0,4
K	3-2,5	2,5-2,2	2,2-2	2-1,75	1,75-1,65

Из таблицы 5 видно, что к.п.д. эрлифта зависит от коэффициента погружения смесителя. Выбор коэффициента погружения является довольно сложным. Практически при этом прибегают к методу подбора. Задаются несколькими величинами коэффициента погружения, производят расчёты для каждого его значения, выбирают компрессор и оценивают к.п.д. всей системы. Затем строят кривые к.п.д. эрлифтной установки от коэффициента погружения и останавливаются на таком его значении, при котором имеет место максимальный к.п.д. установки. Более просто эта задача решается с помощью графиков и номограмм [13].

Подъём смеси жидкости с пузырьками воздуха возможен только при определённом давлении, развиваемом компрессором. При выходе из перфорированной трубы (смесителя или форсунки) пузырьки воздуха находятся под давлением столба жидкости. На изливе это давление близко к атмосферному. При движении воздуха, нагнетаемого по трубам, и движении эмульсии по водоподъёмной колонне труб возникают потери напора в результате действия сил трения. Поэтому в момент начала действия эрлифта компрессор должен развить давление p_0 , называемое пусковым и определяемое выражением

$$p_0 = 0,1(Kh - h_0 + 2), \text{ кгс/см}^2, \quad (100)$$

где K – коэффициент погружения смесителя; h и h_0 – динамический и статический уровни жидкости от излива, м;

В процессе работы эрлифта компрессор должен развивать рабочее давление, определяемое выражением вида

$$p_p = 0,1[h(K - 1) + 5], \text{ кгс/см}^2. \quad (101)$$

При выборе параметров эрлифтной установки определяются площади сечения водоподъёмных труб у смесителя S_1 и у излива S_2 , или их внутренний диаметр, при помощи выражений

$$S_1 = \frac{q_1}{v_1}; S_2 = \frac{q_2}{v_2}, \quad (102)$$

где q_1 и q_2 – расходы смеси воды с воздухом у смесителя и на изливе, м³/с; v_1 и v_2 – скорости движения смеси соответственно у смесителя и на изливе, м/с.

Расходы смеси у смесителя и на изливе могут быть определены выражениями

$$q_1 = Q + \frac{v_1}{(p_p - 1)}, \quad (103)$$

$$q_2 = Q + v_2, \quad (104)$$

где Q – расход жидкости, поднимаемой из скважины, м³/с; p_p – рабочее давление компрессора, кгс/см².

Скорости движения смеси у смесителя и на изливе зависят от глубины уровня жидкости в скважине по отношению к уровню излива (таблица 6)

Таблица 6 – Скорости движения смеси у смесителя и на изливе

Глубина динамического уровня жидкости (от уровня излива), м	Скорость движения смеси, м/с	
	у смесителя	на изливе
10	1	5
20	1,8	6
40	2,7	7

Отверстия для излива водно-воздушной смеси должны располагаться выше уровня жидкости в скважине на расстоянии не менее величины проходки за рейс. При концентрическом расположении водоподъемной и воздухоподающей труб внутренний диаметр водоподъемных труб может быть определен по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4S + \pi d_1^2}{\pi}}, \text{ мм} \quad (105)$$

где d_1 – наружный диаметр воздухоподводящих труб, мм; S – площадь сечения канала водоподъемных труб, мм.

При выборе компрессора его производительность принимается из расчёта

$$V_k = 1,2V, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (106)$$

Давление компрессора определяется выражением

$$p_k = p_p + \sum_{i=1}^{i=n} p_i, \text{ кгс/см}^2 \quad (107)$$

Где $\sum_{i=1}^{i=n}$ – сумма потерь давления сжатого воздуха в воздушной линии от компрессора до эрлифта, обычно 0,4 - 0,7 кгс/см².

Для определения производительности и напора известных конструкций эрлифтных установок, применяемых при бурении, Т.С. Илларионов и А.И. Кирсанов предлагают специальную номограмму (рисунок 16). Номограмма позволяет быстро решать следующие задачи:

1. Определение максимальной производительности и максимального напора при заданных условиях.

2. Определение максимальной глубины бурения при заданных параметрах.

Порядок работы при бурении с эрлифтной установкой заключается в следующем. Перед пуском бурового снаряда замеряется глубина статического уровня жидкости. Определяется длина бурового инструмента до забоя H_2 ниже смесителя

$$H_2 = L - H, \quad (108)$$

где L – глубина скважины, м; H – глубина погружения эрлифта, м.

Затем опускают буровой снаряд, эрлифт и колонну бурильных труб с соблюдением установленных правил.

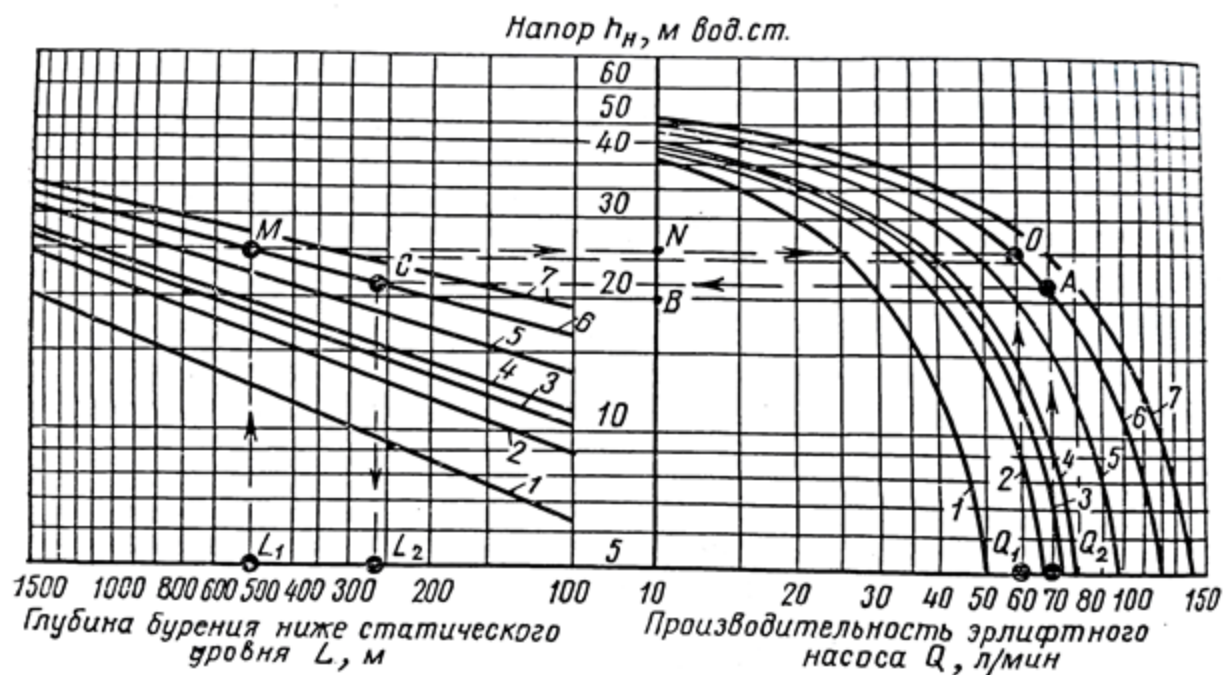


Рисунок 16 – Номограмма для определения производительности Q и напора h_n эрлифтных установок:

1 – НЭ-50П; 2 – НЭ-60,3П; 3 – конструкция СГИ; 4 – конструкция треста Кривбассгеология; 5 – конструкция ВИТР; 6 – НЭ-63,5П (I); 7 – НЭ-63,5П (II).

Ключи: $L_1 \rightarrow M \rightarrow N \rightarrow O \rightarrow Q_1$ (60 л/мин), $Q_2 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow L_2$ (260 м)

После спуска всех труб и подключения компрессора снаряд приподнимают над забоем на 0,5 м и подают воздух в колонну.

При достижении пускового давления произойдёт выброс водно-воздушной смеси из бурильных труб, сопровождаемый хлопком. После этого давление упадёт до рабочего, и эрлифт начнёт работать. Снаряд осторожно ставят на забой с вращением, не допуская снижения давления воздуха более чем на 0,25 кгс/см².

Бурение ведётся на установленном для конкретных условий режиме с учётом прочности колонны, характера пород, конструкции забойного инструмента и нормальной работы эрлифта. Последнее контролируется по показанию воздушного манометра. Уменьшение или прекращение расхода жидкости сопровождается падением давления. По мере заполнения колонкового снаряда керном давление воздуха будет плавно снижаться, но к концу рейса не более чем на 0,5-0,8 кгс/см². Если по каким-либо причинам циркуляция жидкости прекращается (работа эрлифта) и её нельзя восстановить путём расхаживания снаряда или ограничением подачи инструмента и вращения, рейс прерывается и снаряд поднимается на поверхность.

1.6 Пневмо-эжекционный способ удаления бурового шлама

В основу разработанного пневмо-эжекционного способа положены новые принципы формирования и движения воздушно-шламового потока в скважине и конструктивного построения бурового става.

Во-первых, в буровом ставе происходит разделение потока сжатого воздуха, который распределяется по вертикальным зонам (участкам) скважины. Во-вторых, буровой став сформирован из гладкоствольных штанг, шнекового пневмо-эжекционного эвакуатора и долота с эжекционными каналами. В-третьих, в процессе бурения скважины происходит регулирование параметров сжатого воздуха и концентрации воздушно-шламового потока. В-четвертых, в вертикальных зонах скважины создается эжектирование воздушно-шламового потока разделенными струями сжатого воздуха. В-пятых, воздушно-шламовый поток в затрубном пространстве скважины движется по спирали за счет закручивания эжекционными струями сжатого воздуха.

Пневмо-эжекционный способ эвакуации бурового шлама из скважины реализуется следующим образом. Сжатый воздух подают в буровой став, на котором установлено разборное долото, показанное на рисунке 17, имеющее эжекционную схему продувки забоя скважины.

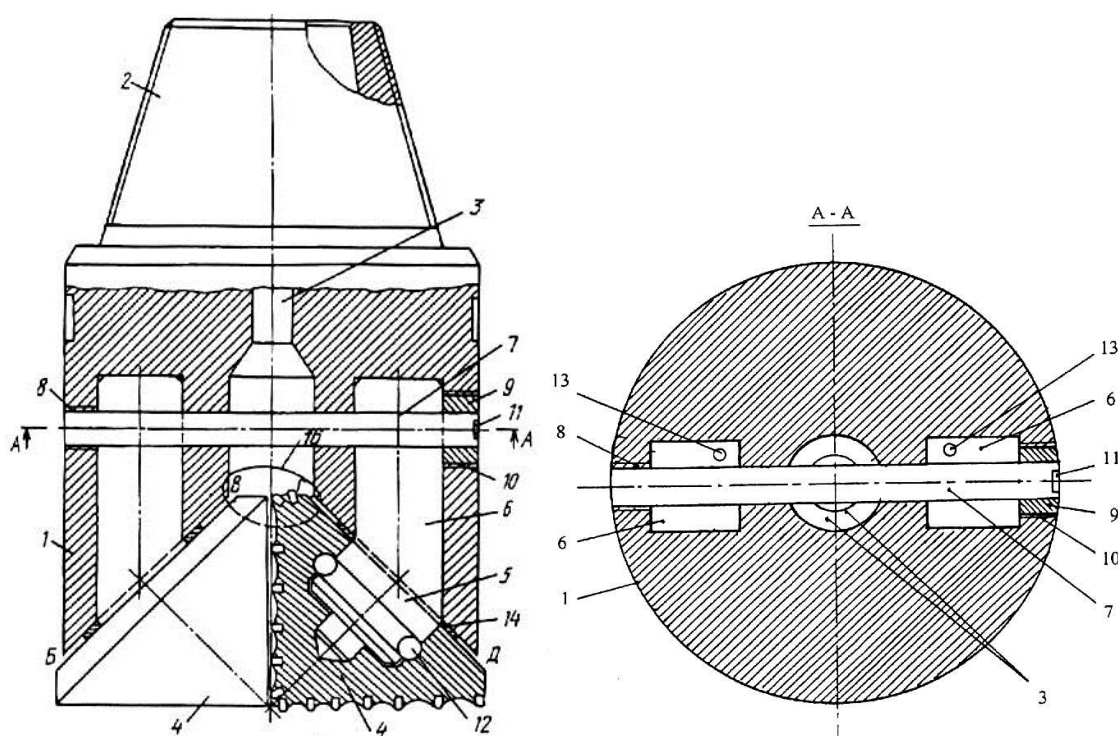


Рисунок 17 - Разборное буровое долото шарошечного типа (РШД-К-Ц):

1 – корпус; 2 – ниппель; 3 – продувочные каналы; 4 – шарошки; 5 – лапа; 6 – хвостовик; 7 – крепёжный стержень; 8 – отверстие с резьбовым соединением (или без него); 9 – крепёжная гайка; 10 – ответное отверстие; 11 – выемка; 12 – подшипник качения; 13 – канал; 14 – прокладочная шайба; 15 – технологические вырезы; 16 – канал; 17 – забой

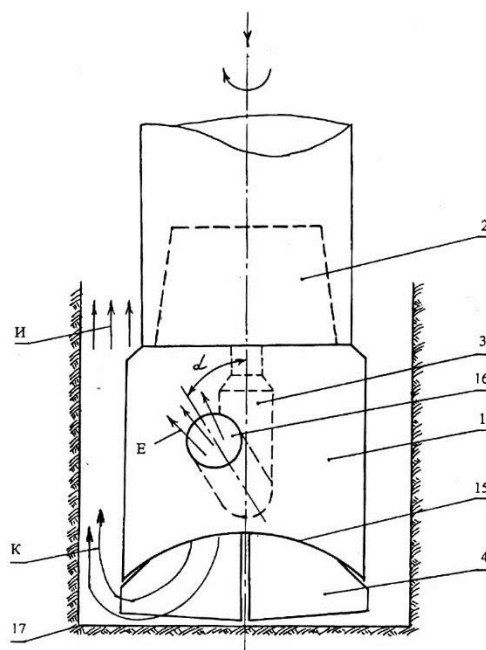


Рисунок 17, лист 51

Удаление бурового шлама из скважины шнеками имеет ряд существенных недостатков: большие затраты мощности на процесс очистки; ограничение механической скорости бурения за счет недостаточной транспортирующей способности бурового става; низкую износостойкость спиралей штанг; возможность заклинивания бурового става при бурении в мягких обводненных или трещиноватых породах.

Шнекопневматический способ удаления бурового шлама из скважины также имеет ряд серьезных недостатков, ограничивающих его применение: существенные затраты мощности на вращение бурового става, резко возрастающие с увеличением диаметра скважин. Кроме того, шнековый буровой став увеличенного диаметра имеет большую массу и стоимость, его изнашивание носит интенсивный характер, а восстановление требует значительных расходов.

Транспортирование бурового шлама из скважины на поверхность сжатым воздухом (пневмоочистка) требует значительного расхода сжатого воздуха и сопровождается большими энергетическими затратами; при этом затрудняется эвакуация бурового шлама при прохождении прослоек глин из-за возникновения сальников и забивания продувочных каналов долота. Кроме того, возникает опасность заштыбовки затрубного пространства и прихватов бурового става в скважине, что вынуждает снижать скорость бурения.

В работе предложен новый способ эвакуации продуктов разрушения пород из скважины с реализующими его устройствами, сочетающий преимущества пневматического и шнекопневматического способов и в то же время устраняющий их недостатки.

Из бурового става сжатый воздух с расходом F_2 ступает в корпус 1 долота через полый ниппель 2, а в корпусе по продувочному каналу 3 одновременно подается в эжекционные каналы Н и нижнюю часть породоразрушающих элементов 4 через технологические вырезы А (рисунок 18).

Так как корпус 1 имеет циклическую форму, отсутствие больших межсекционных пространств (продувочных окон) в долоте обуславливает повышенное избыточное давление сжатого воздуха в технологических вырезах Λ , поэтому эжекционные каналы Н обеспечивают создание дополнительного потока Е, направленного под углом α к оси долота в сторону его вращения. Этот поток эжектирует призабойную зону скважины, суммируется с образованным через продувочный канал 3 потоком сжатого воздуха К, поднимающимся от забоя, увеличивает скорость восходящего потока И в призабойной зоне и активирует удаление бурового шлама в периферийной зоне М забоя скважины, препятствуя образованию “сальников”.

Принятая форма нижней части корпуса и приближенность канала Н к забою обеспечивает упорядоченный и безвозвратный вынос бурового шлама в наддолотную часть скважины. Косая направленность воздушного потока Е под углом α к оси долота создает при его вращении спиральный поток с большой скоростью, который улучшает эвакуацию бурового шлама из призабойной зоны скважины.

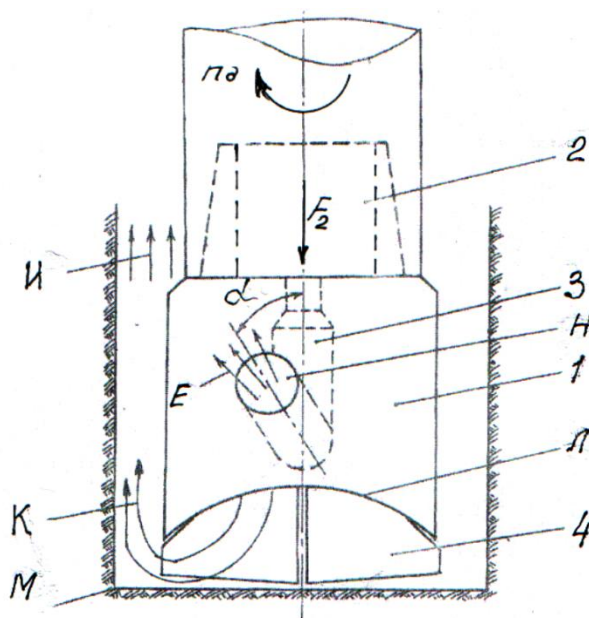


Рисунок 18 - Схема продувки забоя скважины долотом с эжекционными каналами

Буровой став также содержит гладкоствольные штанги 1, из которых концевая штанга соединена со шнековым пневмо-эжекционным эвакуатором 2 (рисунок 19). Гладкоствольные штанги 1 со стенкой скважины 3 образуют затрубную зону I–II, а шнековый пневмо-эжекционный эвакуатор 2 (ШПЭ) со стенкой скважины 3 – шнековую зону II–III. На ШПЭ установлены верхний конус 4 и нижний конус 5, которые со стенками скважины 3 образуют, соответственно, конфузорный (в области сечения II–II) и диффузорный участки (в области сечения III–III).

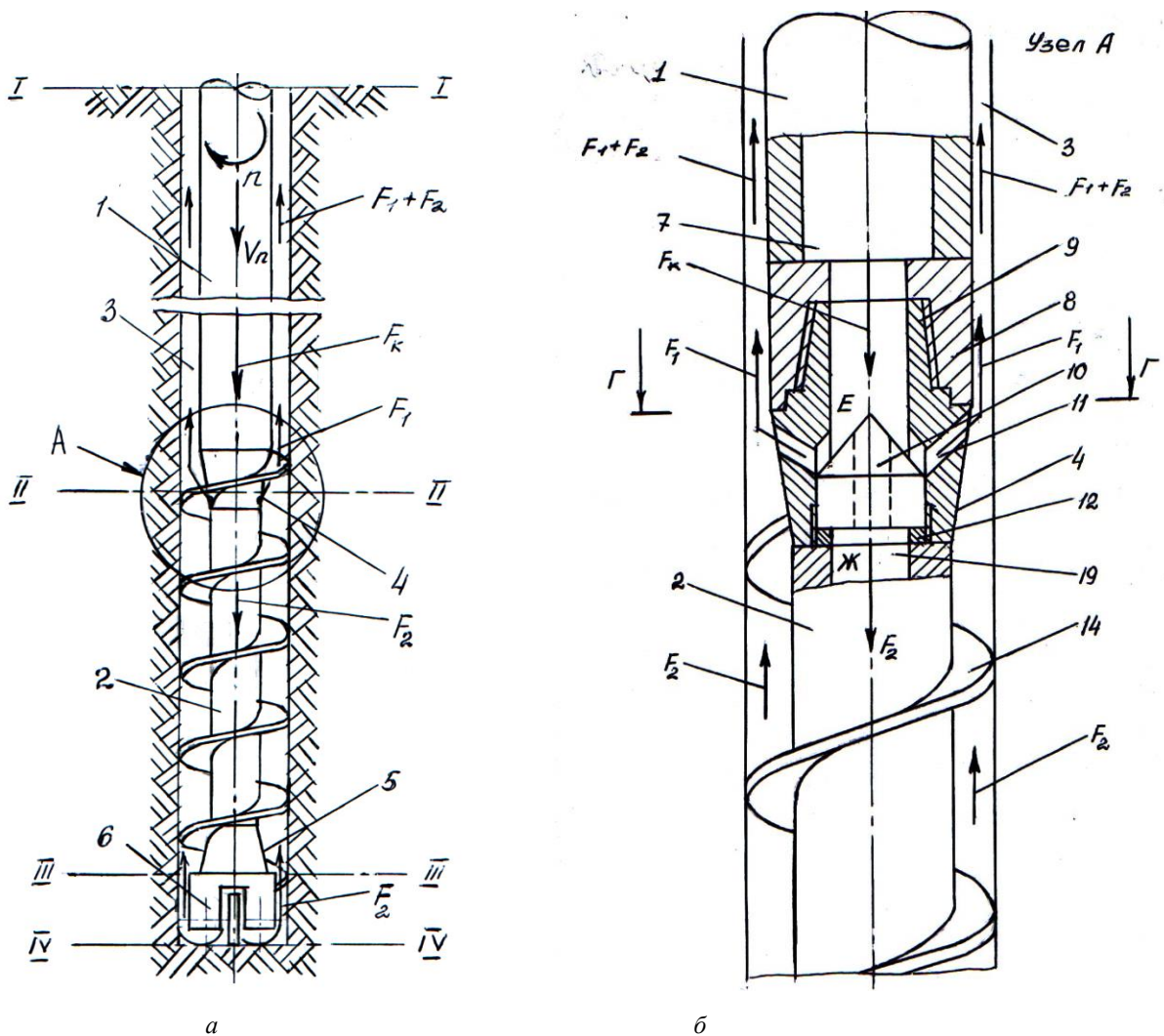
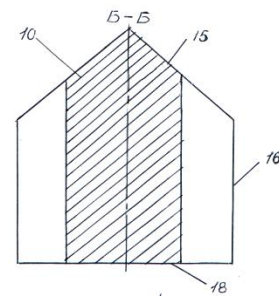
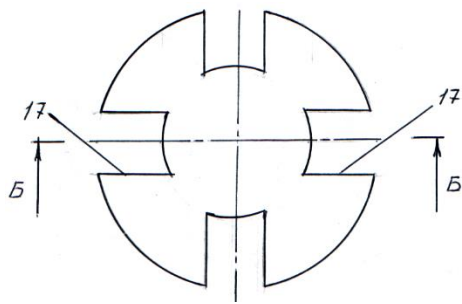


Рисунок 19 - Пневмо-эжекционная эвакуация бурового шлама из скважины:
 а – общий вид бурового става со шнековым пневмо-эжекционным эвакуатором (ШПЭ); б –
 разделение потока сжатого воздуха в механизме управления ШПЭ

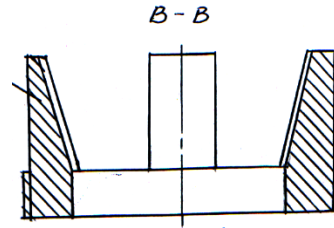
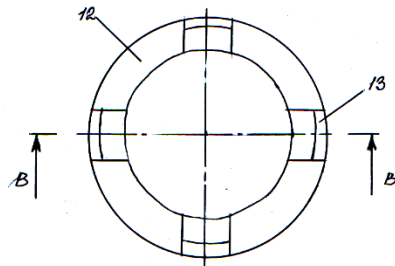
В нижний конус 5 ШПЭ установлено долото 6, которое со скважиной 3 образует призабойную зону III–IV. Гладкоствольная штанга 1 содержит центральный канал 7 и муфту 8, в которой ШПЭ закреплен с помощью ниппеля 9 (рисунок 19, а).

В верхнем конусе 4 ШПЭ установлен механизм управления, содержащий подвижный клапан 10 (рисунок 19, б, в), расположенный непосредственно под эжекционными каналами 11 и зафиксированный от вращения регулирующей гайкой 12 посредством выступов 13 (рисунок 19, г).

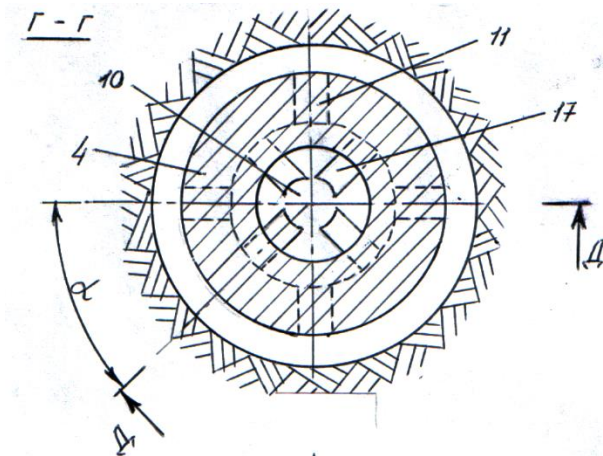
ШПЭ содержит спираль 14, витки которой расположены под острым углом к горизонтальной плоскости. Подвижный клапан 10 имеет конусную часть 15 (рисунок 19, в), цилиндрическую часть 16, проходные каналы 17 (рисунок 19, д) и днище 18, находящееся непосредственно над центральным каналом 19 ШПЭ (рисунок 19, е).



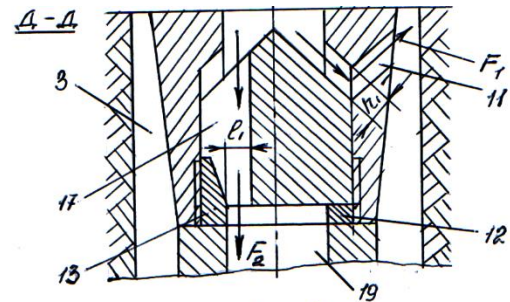
6



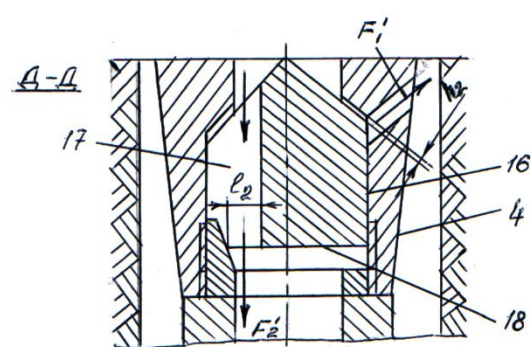
2



Положение 1



Положение 2



д

е

Рисунок 19 - Пневмо-эжекционная эвакуация бурового шлама из скважины:
 в – подвижный клапан механизма управления; з – регулирующая гайка механизма управления;
 д – расположение проходных каналов подвижного клапана и эжекционных каналов ШПЭ; е –
 схема работы механизма управления (положение 1 – эжекционные каналы открыты;
 положение 2 – эжекционные каналы закрыты)

Сжатый воздух с расходом F_k от компрессора бурового станка подается через центральный канал 7 гладкоствольной штанги 1 в верхний конус 4 ШПЭ (рисунок 19, а), где распределяется на два потока с расходами F_1 и F_2 с помощью подвижного клапана 10 (рисунок 19, б).

Один поток сжатого воздуха с расходом F_1 , отражаясь от конусной части 15 подвижного клапана 10, поступает через эжекционные каналы 11 (рисунок 19, е, положение 1) и насадки (на рис. не показаны) в затрубную зону I–II. Другой поток сжатого воздуха с расходом F_2 через проходные каналы 17 клапана 10 (рисунок 19, е, положение 2) поступает в центральный канал 19 ШПЭ и далее через продувочные каналы долота 6 на забой скважины 3 (сечение IV–IV, рисунок 19, а).

В призабойной зоне III–IV скважины сжатый воздух с расходом F_2 поднимает буровой шлам и подает его на первый виток ШПЭ. Образующийся в призабойной зоне III–IV воздушно-шламовый поток перемещается вверх по межвитковому пространству спирали 14 (в шнековой зоне скважины), установленной на ШПЭ. В шнековой зоне скважины эвакуация бурового шлама, таким образом, происходит комбинированно: за счет потока сжатого воздуха, создающего силу давления, действующую на частицы бурового шлама, и за счет сил трения этих частиц о витки спирали 14 и стенку скважины 3.

Поток сжатого воздуха с расходом F_1 при выходе с большой скоростью из эжекционных каналов 11 и насадок ШПЭ поступает в конфузторный участок, образуемый верхним конусом 4 и стенкой скважины 3, где создается эжекционное сечение II–II с давлением сжатого воздуха, значения которого ниже давления воздушно-шламового потока, поступающего из шнековой зоны II–III скважины 3.

В эжекционное сечение II–II устремляется воздушно-шламовый поток, при этом увеличивается порозность шламового слоя и снижается концентрация твердой фазы (шлама). Далее, в затрубной зоне I–II до устья скважины, эвакуация бурового шлама осуществляется энергией объединенных потоков сжатого воздуха с расходом $F_k = F_1 + F_2$.

Для обеспечения бесперебойного шламоудаления площадь сечения проходных каналов 17 подвижного клапана 10 принята равной площади сечений эжекционных каналов 11, выполненных в верхнем конусе 4 ШПЭ, а их сумма равна площади сечения продувочного канала долота 6. При этом обеспечивается равенство расходов потоков сжатого воздуха, разделяемых в верхнем конусе 4 ШПЭ, т.е. $F_1 = F_2 = 0,5 F_k$. При $F_1 < F_2$ может произойти зашламовывание затрубной зоны I–II скважины 3. При $F_1 > F_2$ из-за падения скорости воздуха может произойти зашламовывание призабойной зоны III–IV или шнековой зоны II–III скважины 3. Кроме того, в затрубной зоне II–III возможно возникновение противодавления, при котором поток сжатого воздуха с расходом F_1 может устремиться вниз и приостановить эвакуацию бурового шлама.

Равенство расходов разделенных потоков сжатого воздуха, обеспечиваемое помощью равенства площадей сечений проходных каналов 17 подвижного клапана 10, создает устойчивый режим эвакуации бурового шлама из скважины. Подвижный клапан 10 при этом займет нижнее положение в ШПЭ (рисунок 19, е, положение 1). В случае нарушения устойчивого режима эвакуации бурового шлама из скважины (например, при увеличении скорости проходки скважины во

встретившихся прослойках с небольшим коэффициентом крепости повысится концентрация бурового шлама) вследствие повышения стесненности движения расход сжатого воздуха на выходе из долота 6 понизится.

В результате этого в центральном канале 19 ШПЭ, а следовательно, в области Ж (рисунок 19, б) давление сжатого воздуха возрастет на величину ΔP по сравнению с давлением в области Е и, действуя на днище 18 подвижного клапана 10, поднимет его вверх (рисунок 19, е, положение 2).

Таким образом, включится в работу механизм управления: подвижный клапан 10 своей цилиндрической частью 16 перекроет часть площади сечений эжекционных каналов 11. При этом ширина эжекционных каналов 11 уменьшится на величину $\Delta h = h_1 - h_2$, что приведет к снижению расхода сжатого воздуха на величину $\Delta F = F_1 - F_1^1$.

Вместе с этим при подъеме подвижного клапана 10 увеличится ширина проходных каналов 17 на величину $\Delta l = l_2 - l_1$. В этом случае произойдет перераспределение расходов F_1 и F_2 потоков сжатого воздуха. В зону забоя долота 6 через центральный канал 19 ШПЭ поступит поток сжатого воздуха с расходом $F_2^1 = F_2 + \Delta F$, который увеличит скорость воздушно-шламового потока в призабойной и шнековой зонах и стабилизирует режим эвакуации бурового шлама, снизив уровень стесненности движения за счет увеличения порозности шламового слоя и уменьшения концентрации твердой фазы в воздушно-шламовом потоке. Давление в наддолотной части и центральном канале 19 шнекового забурника-эвакуатора 2 понизится, подвижный клапан 10 займет крайнее нижнее положение в верхнем конусе 4, открыв эжекционные каналы 11. Это приведет к выравниванию расходов F_1 и F_2 потоков сжатого воздуха и их давлений в областях Е и Ж и обеспечит устойчивый режим эвакуации бурового шлама.

Для эффективного регулирования параметров сжатого воздуха подвижный клапан 10 в верхнем конусе 4 ШПЭ устанавливают таким образом, чтобы его проходные каналы 17 не совпадали с эжекционными каналами 11. Это достигается посредством регулирующей гайки 12, выступы 13 которой входят в проходные каналы 17 подвижного клапана 10.

При резьбовом соединении регулирующей гайки 12 в верхнем конусе 4 между проходными каналами 17 и эжекционными каналами 11 устанавливают угол α (рис. 4.40, д). Резьбовое соединение регулирующей гайки 12 с верхним конусом 4 позволяет регулировать ход подвижного клапана 10, что дает возможность обеспечить равенство площадей сечений проходных каналов 17 и эжекционных каналов 11.

Параметры ШПЭ, такие как угол подъема спирали, шаг спирали, диаметр шнека и диаметр вала, устанавливают из условия обеспечения максимальной скорости потока сжатого воздуха в шнековой зоне скважины. При этом значения силы давления воздушного потока, действующие на частицы бурового шлама, будут также иметь максимальные значения, если угол между векторами абсолютной и переносной скоростями движения этих частиц будет равен 45° .

Диапазон регулирования параметров сжатого воздуха (давления и расхода) устанавливают исходя из условия обеспечения такой концентрации потока бурового шлама, которая не должна превышать предельно допустимых значений.

Это достигается путем установления заданных значений перепада давления в центральном канале 19 ШПЭ и центральном канале 7 гладкоствольной штанги 1 при зашламовывании призабойной или шнековой зоны.

1.7 Выводы

Подводя итоги к выше сказанному, можно сказать, что самым перспективным из рассмотренных способов очистки буровых скважин является пневмо-эжекционный метод. Он сочетает в себе достоинства пневматического и шнекового бурения, а также он устраняет их некоторые недостатки. Например, устраняет осложнения бурения в липких и вязких глинах из-за налипания их на шнеки из-за присутствия движущегося воздуха; уменьшение расхода долот и шнеков при проходке твёрдых и абразивных породах благодаря лучшей очистке забоя. Также главным достоинством данного метода является наличие саморегулирующегося воздушного клапана, который в зависимости от количества шлама в забое контролирует количество подаваемого воздуха.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМО-ЭЖЕКЦИОННОГО СПОСОБА УДАЛЕНИЯ БУРОВОГО ШЛАМА

2.1 Экспериментальный стенд

С целью визуализации пневмо-эжекционного способа шламоудаления [14] на кафедре «Горные машины и комплексы» ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» были разработаны и созданы два лабораторных стенда. Изготовление стендов производилось с соблюдением геометрического подобия системы буровой став – скважина.

Целью лабораторных испытаний было установление эффекта эжекции сыпучего материала с помощью разделенных струй сжатого воздуха по вертикальным зонам скважины.

Первый стенд состоит (рисунок 20) из имитатора скважины, в котором находится имитатор бурового става, соединенный нагнетательным воздухопроводом с компрессором. От оригинала имитатор отличается тем, что в конструкции стенда не предусмотрены витки шнека и вращение бурового става.

В качестве бурового шлама применен измельченный пенопласт со средним размером частиц 12 мм, помещенный в имитатор скважины, выполненный из прозрачного материала для визуального наблюдения за движением частиц.

Имитатор бурового става состоит из двух гладкоствольных труб, имеющих разные диаметры (большой диаметр соответствует гладкоствольной штанге, малый – шнековой штанге), соединенных между собой конфузорным (внизу) и диффузорным (вверху) участками.

На конфузорном участке имеется центральный продувочный канал для подъема шлама из забоя скважины, а на диффузорном участке выполнены четыре эжекционных отверстия, расположенных под углом к вертикали 35° . В верхней части гладкоствольной штанги находится бункер для сбора шлама, закрытый

сеткой, служащей для предотвращения выноса этого шлама за пределы имитатора скважины.



Рисунок 20 – Стенд №1 для исследования пневмо-эжекционного удаления бурового шлама из скважины

Пневмо-эжекционный стенд работает следующим образом. Сжатый воздух от компрессора поступает через нагнетательный трубопровод в верхнюю часть имитатора бурового става. Проходя по его внутреннему каналу, поток сжатого воздуха распределяется на два потока, первый из которых подается через эжекционные отверстия в затрубную зону, второй через проходной канал конфузрного участка – в призабойную зону.

В призабойной зоне второй поток сжатого воздуха смешивается со шламом и, образуя воздушно-шламовый поток, поднимается в шнековую зону и далее – в затрубную, где соединяется с первым воздушным потоком.

Первый поток сжатого воздуха, выходя из эжекционных отверстий, расположенных под углом 35° к вертикальной оси бурового става, создает эжекционный эффект. В результате этого в зоне эжекционных отверстий частицы шлама приобретают ускорение движения и поднимаются вверх со значительно большей скоростью, чем в шнековой зоне. В верхней части имитатора бурового става частицы шлама оседают в цилиндрическом бункере.

Второй стенд, также как и первый стенд, состоит из имитатора скважины (рисунке 21), в котором находится имитатор бурового става, который приводится во вращение от двигателя через ременную передачу. В нижней части имитатор

соединен нагнетательным воздухопроводом с компрессором, а в верхней части – установлен цилиндрический бункер для сбора частиц шлама.

На рисунке 20 можно видеть, что порозность воздушно-шламового потока (величина, характеризующая объем пустот между твердыми частицами) увеличивается, а объемная концентрация уменьшается при движении частиц от призабойной зоны к устью скважины. Это достигается эжекционным эффектом, образующимся в зоне эжекционных отверстий, и увеличением скорости воздуха в затрубной зоне скважины за счет объединения воздушных потоков.



Рисунок 21 – Стенд № 2 для исследования пневмо-эжекционного удаления бурового шлама из скважины

Следует ожидать, что работа в шнековой зоне шнекового пневмо-эжекционного эвакуатора, как это показано на рисунке 19, приведет к более эффективной подаче частиц шлама в эжекционную зону и далее по затрубному пространству к устью скважины.

2.2 Методика исследований

Данный стенд позволяет провести комплекс лабораторных исследований. Исследования проводились в трех режимах работы:

1) Пневмо - эжекционная очистка от бурового шлама. Опыт проводится при включённом компрессоре и неподвижном шнеке.

2) Шнековая очистка. Опыт проводится при выключенном компрессоре и включённом шнеке.

3) Пневмо – эжекционная очистка от бурового шлама. Опыт проводится при включённых компрессоре и вращающемся шнеке.

Для проведения лабораторных исследований со стендом использовалась видеокамера высокого разрешения. На камеру записывалось проведение эксперимента, после чего видеозапись преобразовывалась в цифровое видеоизображение и производилась раскадровка через каждые 35 мс. На кадре измерялся путь, проходимый определенной частицей бурового шлама за известный промежуток времени и по формуле

$$v = \frac{\Delta S}{100\Delta t}, \text{ м/с}, \quad (109)$$

где S - расстояние с начала движения, см; Δt - время между замерами, с; $\Delta t = 0,035\text{с}$

Измерения производились по нескольким опытам в каждом из трех режимов работы.

2.3 Результаты исследований

Измерения производились по нескольким опытам в каждом из трех режимов работы. По результатам измерений были построены графики, представленные на рисунках 22-24.

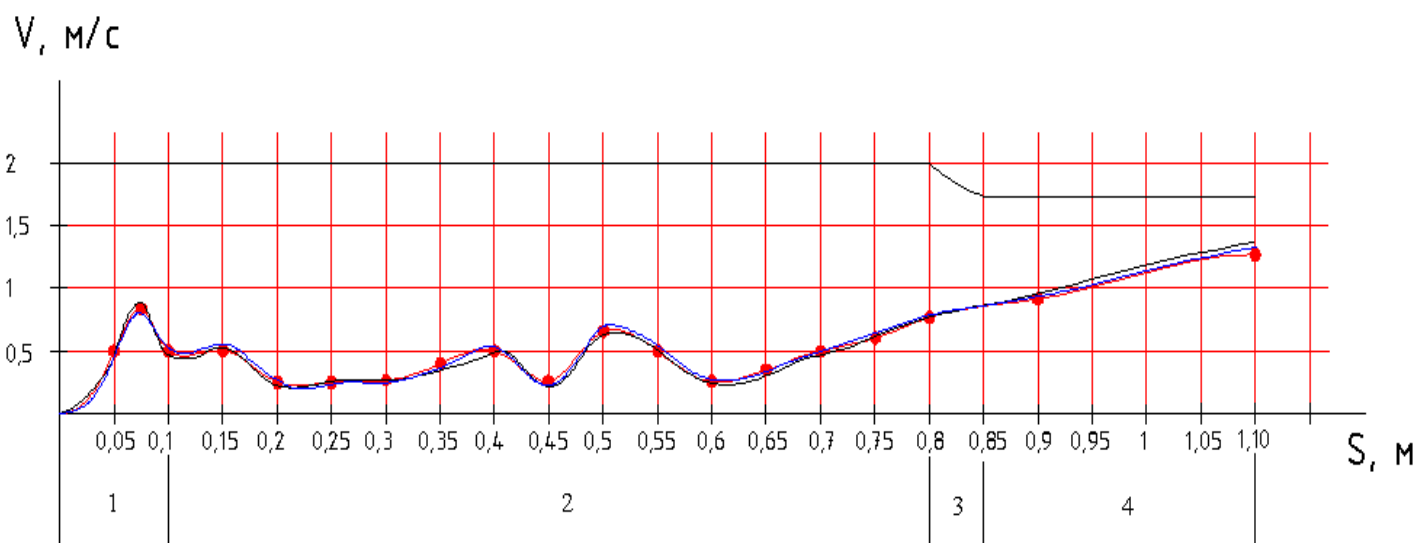


Рисунок 22 - График зависимости скорости частицы и сечения затрубного пространства от расстояния до забоя $v = f(S)$; $F = f(S)$ (неподвижный шнек, компрессор включен):

1 - призобойная зона; 2 - шнековая зона; 3 - зона диффузора; 4 - зона гладкоствольного става

По графику (рисунок 22) пневмо-эжекционной очистки с остановленным шнеком видно, что в призобойной зоне 1 скорость резко увеличивается и падает, что объясняется большой плотностью частиц бурового шлама. В средней части шнековой зоны 2 происходит колебания скорости частиц, после чего наблюдается

устойчивый рост скорости движения частиц бурового шлама за счет эжекционного эффекта (до зоны диффузора 3) и уменьшения сечения затрубного пространства 4.

По графику (рисунок 23) шнековой очистки видно, что данной скорости вращения шнека (около 1 рад/с) недостаточно для осуществления очистки скважины данным способом.

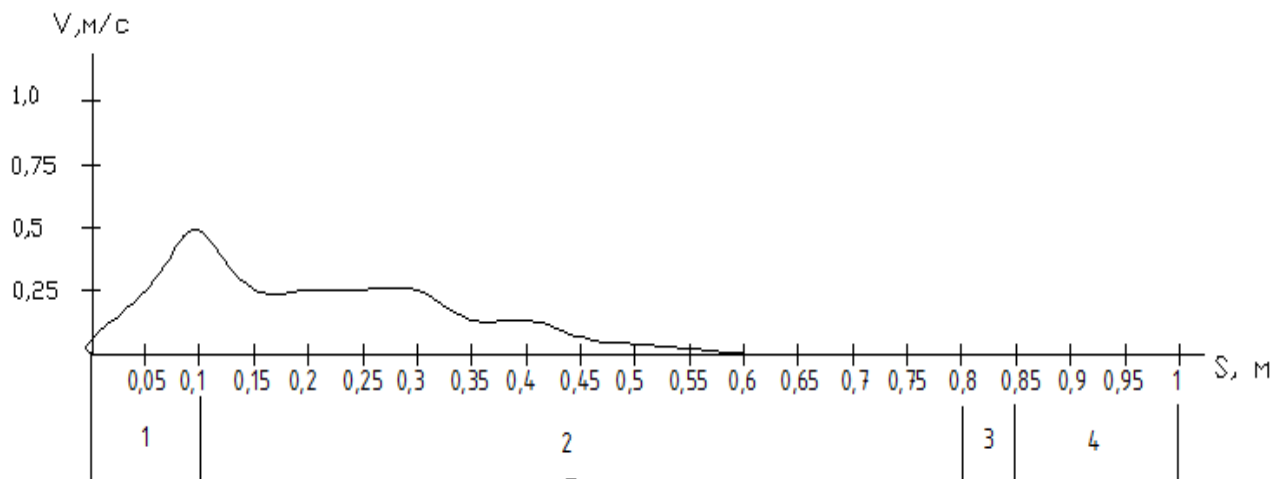


Рисунок – 23 График зависимости скорости частицы (отключенный компрессор, подвижный шнек)

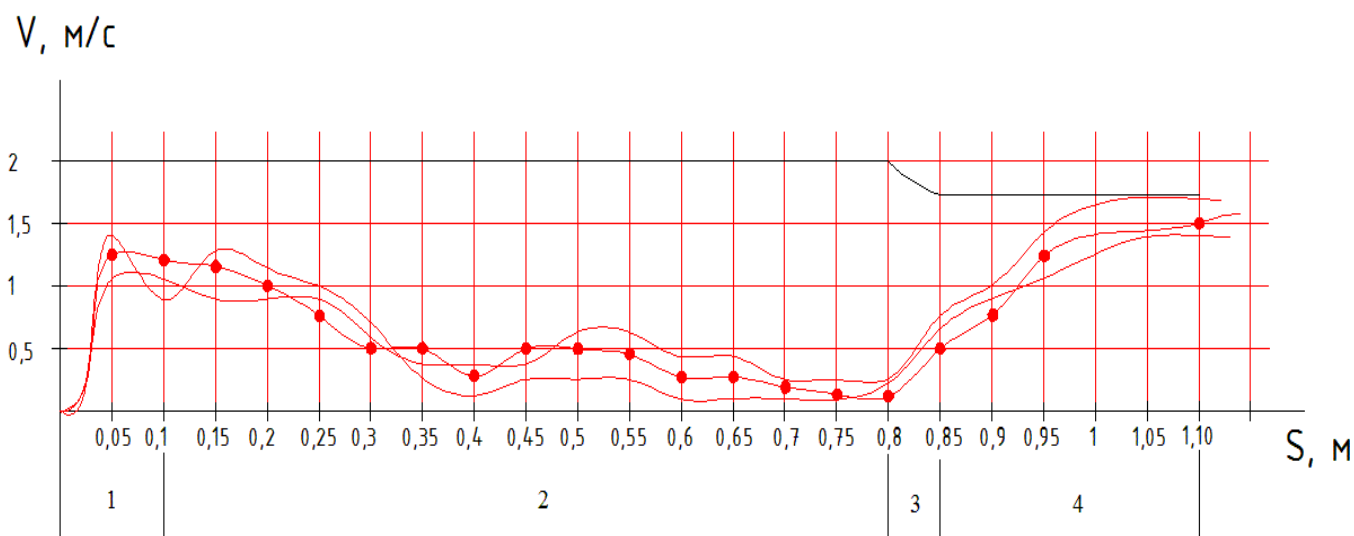


Рисунок 24 - График зависимости скорости частицы и сечения затрубного пространства от расстояния до забоя $v = f(S)$; $F = f(S)$ (подвижный шнек, компрессор включен)

Для удобства анализа пневмо-эжекционной очистки при включенном шнеке, данные по каждому из режимов усреднены и совмещены на графике (рисунок 24). Из графика видно, что при комбинации двух способов увеличивается начальная скорость частиц бурового шлама в призабойной зоне, что положительно сказывается на очистке бурового инструмента, причем скорость сохраняется на большем участке скважины, чем при неподвижном шнеке; на сопряжения двух зон – шнековой и диффузорной возникает провал скорости, что объясняется подпором

воздуха из эжекционных отверстий, однако при этом частицы получают большее ускорение чем при неподвижном шнеке и имеют большую конечную скорость. Средняя скорость движения частиц бурового шлама по скважине выше при пневмо-эжекционном удалении бурового шлама с включенным шнеком.

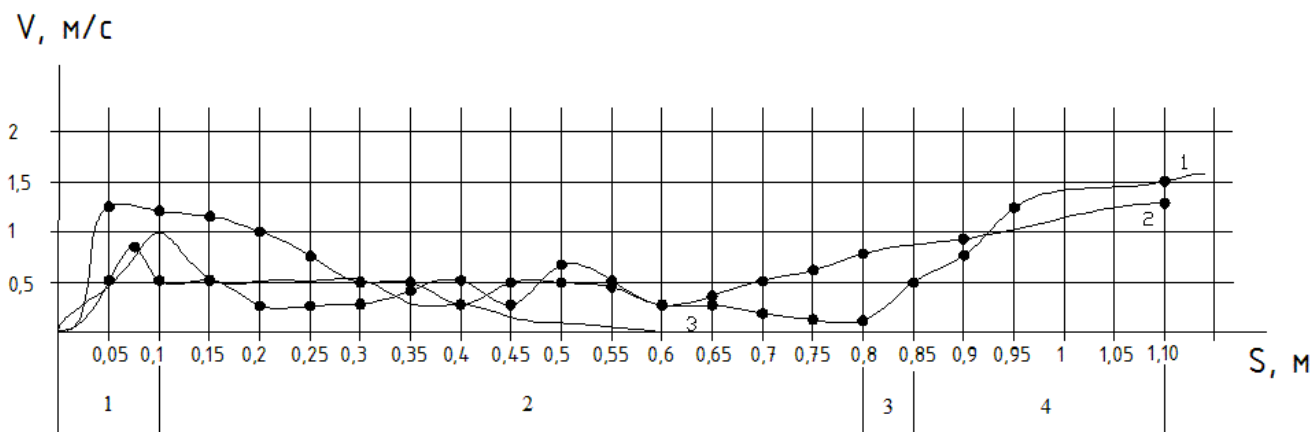


Рисунок 25 - График зависимости скорости частиц бурового шлама от расстояния до забоя при различных режимах работы:

1 – пневмо-эжекционный способ с вращающимся шнеком; 2 - пневмо-эжекционный способ при неподвижном шнеке; 3 – шнековый способ.

2.4 Выводы

Проведенные лабораторные исследования показали, что для дальнейших исследований необходима модернизация стенда:

- увеличение скорости вращения шнека и её регулировка;
- установка воздухораспределительного механизма;
- установка манометров;
- установка расходомеров.

Модернизированный стенд позволит вывести математические зависимости скорости движения частиц шлама от параметров сжатого воздуха и конструкции эвакуатора бурового шлама.

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМО-ЭЖЕКЦИОННОГО УДАЛЕНИЯ

Эффективность пневмо-эжекционной эвакуации бурового шлама может быть оценена посредством проведения расчёта технико-экономических показателей процесса бурения скважин в сравнении с их пневмоочисткой.

Мной выполнен расчёт на основе результатов опытно-промышленных испытаний шнекового пневмо-эжекционного эвакуатора ШПЭ-244,5 на Мазульском известняковом руднике ОАО «Ачинский глинозёмный комбинат» при бурении сложноструктурных горных пород в закарстованных массивах.

Расход сжатого воздуха, необходимого для эффективного удаления бурового шлама из скважины, F , $\text{м}^3/\text{с}$ [15], рассчитаем по формуле

$$F = K_b S V_3 * \sqrt{\frac{P_3}{z_t \rho_0 R T_t}}, \quad (110)$$

где K_b – коэффициент, учитывающий наличие воды в воздухе (при бурении с подачей технологической воды в скважину), $K_b = 1,3-1,5$; S – площадь поперечного сечения кольцевого пространства призабойной зоны скважины, м^2 (при бурении долотом III 244,5 ОК ПВ),

$$S = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - d_d^2), \quad (111)$$

где D_c – диаметр скважины, м ; d_d – средний диаметр корпуса долота, перекрывающего забой скважины (с учётом продувочных окон), м ; V_3 – эквивалентная скорость потока сжатого воздуха, которая в нормальных условиях достаточна для выноса бурового шлама из скважины, V_3 – 15-20 $\text{м}/\text{с}$; P_3 – давление сжатого воздуха в призабойной зоне скважины, Па

$$P_3 = P_k - \Delta P_{\text{ш}} - \Delta P_d, \quad (112)$$

где P_k – давление сжатого воздуха на выходе из компрессора, Па ; $\Delta P_{\text{ш}}$, ΔP_d – потери давления сжатого воздуха, соответственно, в пневмосистеме бурового станка и на долоте, Па (по расчётам, выполненным с учётом известных исходных данных [10], $\Delta P_{\text{ш}} = 0,025 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $\Delta P_d = 0,2 \cdot 10^6 \text{ Па}$); z_t – коэффициент отклонения от закона идеального газа (при малых значениях P_3 и T_t коэффициент $z_t = 1$); ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, $\rho_0 = 1,205 \text{ кг}/\text{м}^3$; R – газовая постоянная, $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T_t – температура сжатого воздуха в зоне забоя скважины, равная примерно 300 К.

Расход сжатого воздуха при пневмоочистке скважины найдём по формуле

$$F_{\text{п}} = 1,4 * 0,011 * 17 * \sqrt{\frac{0,375 * 10^6}{1 * 1,205 * 287 * 300}} = 0,497, \text{ м}^3/\text{с}, (30 \text{ м}^3/\text{мин})$$

Расход сжатого воздуха при пневмо-эжекционной эвакуации бурового шлама из скважины вычислим по формуле

$$F_{\text{пэ}} = 1,4 * 0,011 * 17 * \sqrt{\frac{0,225 * 10^6}{1 * 1,205 * 287 * 300}} = 0,386, \text{ м}^3/\text{с}, (23 \text{ м}^3/\text{мин})$$

Определим необходимую мощность привода компрессора N_k , кВт, бурового станка [9]

$$N_k = 1510,9 * F * (P_k^2 - 0,714), \quad (113)$$

Отсюда необходимая мощность привода компрессора при бурении скважин с пневмоочисткой равна

$$N_{кп} = 1510,9 * 0,497 * (0,6^{0,145} - 0,714) = 161, \text{ кВт}$$

Необходимая мощность привода компрессора при бурении скважин с пневмо-эжекционной эвакуацией бурового шлама равна

$$N_{кпэ} = 1510,9 * 0,386 * (0,45^{0,145} - 0,714) = 103, \text{ кВт}$$

От установленной мощности электродвигателей станка СБШ-250 МНА-32 (409 кВт) мощность привода компрессора составляет:

$$N_{кп} = \frac{N_k}{N} * 100\%, \quad (114)$$

при пневмоочистке скважины от бурового шлама

$$N_{кп} = \frac{160 * 100}{409} = 39 \%$$

при пневмо-эжекционном удалении бурового шлама

$$N_{кп} = \frac{103 * 100}{409} = 25 \%$$

т.е. снижается по сравнению с пневмоочисткой на 14 %.

При уменьшении мощности привода компрессора с использованием пневмо-эжекционной эвакуации бурового шлама снижение годового расхода электроэнергии по сравнению с пневмоочисткой на один буровой станок составляет

$$W = (N_{кп} - N_{кпэ}) * T_{\text{ч}}, \quad (115)$$

$$W = (161 - 103) * 4016 = 232928, \text{ кВт} * \text{ч}$$

где $T_{\text{ч}}$ – среднее количество часов работы в год станка СБШ-250 МНА-32, $T_{\text{ч}} = 4016$ ч.

Экономия средств за счёт снижения расхода электроэнергии на один буровой станок типа СБШ при бурении скважин с пневмо-эжекционным удалением бурового шлама составляет

$$\mathcal{E} = W * C_{\text{эл}}, \quad (116)$$

$$\mathcal{E} = 232928 * 1,23 = 286500 \text{ руб.}$$

где $C_{\text{эл}}$ – стоимость 1 кВт*ч электроэнергии, руб.

В данном расчёте не было учтено некоторое повышение мощности привода вращателя при пневмо-эжекционном способе удаления бурового шлама из скважины, которое по току составляет 5% и не выход за пределы номинальных значений тока электродвигателя.

Таким образом, предлагаемый пневмо-эжекционный способ позволяет повысить эффективность процесса эвакуации бурового шлама за счёт управления (авторегулирования) его концентрацией посредством изменения режимов подачи сжатого воздуха, снизить затраты на бурение, осуществить проходку глинистых пород и закарстованных массивов с меньшими затратами на процесс бурения, снизить мощность вращателя бурового станка, уменьшить расходы на изготовление и ремонт сложных по конструкции шнеков.

4 ПРАВИЛА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ БУРОВЫХ РАБОТ

Основными опасностями возникновения несчастных случаев при бурении скважин являются наличие движущегося рабочего инструмента, размещение бурового станка вблизи бровки уступа, недостаточно устойчивое положение бурового станка при бурении и перемещении.

Для предупреждения несчастных случаев должны соблюдаться следующие меры безопасности при ведении буровых работ:

1. Бурение скважин на карьере осуществляются в соответствии с инструкциями для каждого вида бурения.

2. До прибытия бурового станка на блок необходимо произвести разметку блока с установкой вешек на месте бурения будущих скважин, на которых отмечаются номер скважины и её глубина.

3. Буровой станок устанавливается на спланированные горизонтальные площадки вне призмы возможного обрушения таким образом, чтобы гусеницы бурового станка находились на расстоянии не менее двух метров от бровки уступа, а продольная ось бурового станка перпендикулярно бровке уступа.

4. Запрещается подкладывать под домкрат бурового станка куски горной породы.

5. Бурение первого ряда скважин должно осуществляться дистанционно.

6. При перемещении бурового станка под ЛЭП мачта должна быть опущена. Перемещение должно быть осуществляться по спланированной горизонтальной площадке.

7. Каждая скважина, диаметр которого больше 250 мм, после окончания бурения должна быть перекрыта, а участки пробуренных скважин обязательно обозначить знаками безопасности.

8. Не реже одного раза в неделю механик участка должен проверять исправность подъёмных канатов и при обнаружении порванных проволок, канат необходимо заменить. Результат осмотра каната обязательно фиксировать в оперативном журнале.

А так же при проведении буровых работ должны соблюдаться следующие правила безопасности:

1. Все работы должны производиться в строгом соответствии с утверждёнными проектами и с соблюдением «Единых правил безопасности при осуществлении геологоразведочных работ».

2. Буровые установки (вновь построенные после переезда или передвижные, подвергнувшиеся ремонту) должны запускаться в эксплуатацию только после приёмки их комиссией. Комиссия назначается руководителями геологоразведочной экспедиции. По прохождении экспедиции составляется акт, заверяющий, что малогабаритная буровая установка готова к началу работы и сможет осуществлять её в соответствии со сводом «Единых правил безопасности при осуществлении геологоразведочных работ». При приёвке бурильной установки, которой предстоит забуривание на глубину свыше 1200 метров, в составе комиссии должны присутствовать представители Госгортехнадзора.

3. Абсолютно все рабочие, принимающие участие в буровых работах, должны в обязательном порядке пройти медосмотр, в ходе которого должны учитываться условия их работы, а также профиль их деятельности. Допускать к работе лиц, по состоянию здоровья не способных выполнять свои служебные обязанности, запрещается.

4. К манипуляциям с буровым оборудованием, а также к обслуживанию силовых агрегатов буровых установок, насосов, электростанций и прочего бурового оборудования и инструмента не допускаются лица, не имеющие соответствующего удостоверения. Передача обслуживания и управления буровым оборудованием лицам, не имеющим на это прав, является грубым нарушением техники безопасности.

5. Рабочие допускаются к выполнению работ только после завершения обучения технике безопасности и сдачи соответствующих экзаменов. Рабочим, которым предстоит осуществлять подземные работы, в обязательном порядке необходимо пройти курс по пользованию самоспасателем.

При внедрении новых методов труда или технологических процессов, равно как и при внедрении новых механизмов, инструментов и других видов бурового оборудования, все рабочие обязаны проходить дополнительный инструктаж.

Независимо от успешности проведения работ и используемого бурового инструмента, повторный инструктаж всех рабочих должен проводиться два раза в год.

Прохождение повторного инструктажа должно регистрироваться в «Книге инструктирования рабочих по технике безопасности», а сама книга должна храниться у начальника отряда (руководителя работ) или же у инженера рабочих по технике безопасности.

6. Продолжительность предварительного обучения рабочих назначается главным инженером и может зависеть от характера выполняемых на объекте буровых работ.

По окончании предварительного обучения каждый сотрудник переходит под руководство опытного рабочего и работает в качестве ученика в течение срока, утверждённого программой обучения на производстве. За этот срок ученик должен не только повысить свою квалификацию, но и в полном объёме усвоить правила безопасности производимых работ. После этого ему предстоит сдать экзамен по своей специальности и получить на руки документ, удостоверяющий его право на осуществление манипуляций с буровым оборудованием.

Состав принимающей испытания экзаменационной комиссии формируется начальником партии.

7. Каждый рабочий должен выполнять только тот вид деятельности, по которому он прошёл обучение. Без переквалификации и прохождения инструктажа по технике безопасности его перевод в другие сферы недопустим.

8. Прежде чем начать работу, машинист малогабаритной буровой установки на гусеничной базе должен проверить исправность двигателя, бурового насоса, а также всех предохранительных устройств бурового оборудования.

9. Запрещается: запускать буровое оборудование до полного устранения неисправности; оставлять работающую буровую установку без присмотра; снимать и надевать приводной ремень без остановки двигателя; запускать буровой насос без ограждения ремня; во время работы лебёдки брать руками за канат; запускать оборудование, оставляя на валу лебёдки рукоятку ручного подъёма; запускать силовой агрегат, когда фрикцион станка включен; запускать буровое оборудование без ограждения муфты, шпинделя и других движущихся частей.

10. Машинист, сдающий смену, должен известить обо всех обнаруженных в ходе работы неполадках принимающего машиниста. Кроме того, все неполадки должны быть отмечены буровым мастером в журнале сдачи-приёмки смены.

11. В случае обнаружения малейшей опасности для рабочих, помощник бурового мастера или сам мастер лично обязаны незамедлительно принять меры. Если же ликвидировать опасность нет возможности, работу бурового оборудования необходимо прекратить, после чего эвакуировать персонал в безопасное место и немедленно известить начальника отряда, прораба или старшего мастера.

О чрезвычайном прекращении работ и о ликвидации поломки буровой мастер должен отчитаться в журнале сдачи-приёмки смены.

12. Наличие журнала замечаний по технике безопасности является строго обязательным. Руководитель рабочего процесса (начальник отряда, буровой мастер, прораб) обязан по крайней мере один раз в декаду проверять соблюдение техники безопасности на местах, а о результатах проверки отчитываться в журнале замечаний.

13. Все члены тех. персонала должны быть укомплектованы спецодеждой и всеми необходимыми средствами защиты: касками, диэлектрическими перчатками, защитными очками, предохранительными поясами, рукавицами. Спецодежда подбирается исходя из специфики деятельности рабочего.

14. Все металлические конструкции малогабаритной буровой установки должны быть заземлены. Все применяемые для заземления устройства должны соответствовать требованиям, выдвигаемым разделом «Электротехническое хозяйство» техники безопасности. В непосредственной близости от пусковой аппаратуры всегда должны находиться защитные средства (диэлектрические перчатки и резиновые коврики).

15. При осуществлении бурения близ объектов, являющихся потенциальным источником угрозы для работников (высоковольтные линии электропередач, нефте- и газопроводы) должны быть приняты дополнительные меры предосторожности. Персонал должен быть в обязательном порядке предупрежден об опасности.

16. Ключи, молотки, кувалды, ломы и другой ручной инструмент следует содержать в полной исправности. Все инструменты, оборудованные рукоятями, должны быть прочно укреплены на них. Производить работы неисправным инструментом категорически запрещается.

17. Если рабочий инструмент применяется на высоте более 2 метров над уровнем земли, то его необходимо переносить в специальных сумках, а в процессе работы привязывать.

18. Если того требует специфика работ, следует производить удлинение рукояток ключей. Оно может быть осуществлено посредством надевания на них бесшовных патрубков. Общая длина плеча при этом не должна превышать 2 м.

19. Если работа проводится на высоте 2 метра от земли, то рабочие места должны быть в обязательном порядке оборудованы площадками с мостиками, иметь лестницы и перила. При осуществлении работ на высоте свыше 3 метров все рабочие должны надевать предохранительные пояса. Работать на высоте запрещается при плохих погодных условиях (ливень, гроза, порывистый ветер силой от 5 баллов, сильный снегопад).

20. Работая на высоте, рабочим категорически воспрещается перебрасывать инструмент друг другу. По завершении смены весь вспомогательный буровой инструмент должен быть убран на место.

21. Рабочие помещения стационарных буровых установок в обязательном порядке должны быть оборудованы противопожарным инвентарём.

22. На всех рабочих местах должны быть вывешены таблички, предупреждающие об опасности, а также сопутствующие инструкции и знаки.

23. На всех без исключения производственных объектах буровой вышки должны быть медицинские аптечки. Они должны содержать бинт, йод, вату и подробные инструкции по оказанию первой помощи.

24. Посторонние лица не должны допускаться на объект. Вход во все производственные помещения (буровые установки, насосные станции, передвижные электростанции) должен осуществляться по пропускам.

25. Запрещается допускать к выполнению работы лиц, пребывающих в нетрезвом состоянии.

26. Все связанные с производством несчастные случаи должны расследоваться в соответствии с регламентом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломной работе проведён анализ современных способов очистки скважин от бурового шлама. Главное внимание уделено пневмо-эжекционной эвакуации бурового шлама, так как этот метод является наиболее перспективным для применения во время бурения взрывных скважин.

На основании исследования, можно утверждать, что при комбинировании шнековой и пневматической очистки, скорость частиц бурового шлама значительно выше, чем при отдельном использовании каждого из методов. Исходя из этого, можно сделать вывод, что эффективность очистки забоя значительно повышается.

После завершения исследования, было выявлено, что необходимо модернизировать стенд, что позволит выявить математическую зависимость скорости движения частиц шлама от параметров сжатого воздуха и конструкции эвакуатора бурового шлама.

Так же был произведён экономический расчёт, который показал, что пневмо-эжекционный способ эвакуации экономичней пневматического, благодаря специальной конструкции бурового става, который имеет регулирующий подачу воздуха саморегулирующийся клапан.

Подведя итоги выше сказанному, делаю вывод, что данный метод очистки является перспективным, что позволит не только повысить эффективность очистки, но и уменьшить расходы на электроэнергию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ажгирей, Г.Д. Структурная геология : науч. изд. / Г.Д. Ажгирей. - Изд. МГУ, 1966.
- 2 Волков, А.С. Бурение скважин с обратной циркуляцией промывочной жидкости : науч. изд. / А.С. Волков, А.А. Волокитенков - М. : «Недра», 1970.
- 3 Большаков, В.В. Колонковое бурение с обратной промывкой, как средство повышения выхода керна и получения представительных проб : науч. изд. / В.В. Большаков, А.С. Филько – Изв. ВУЗ «Геология и разведка», 1962, № 2.
- 4 Неудачин, Г.И. и др. Опыт применение пневматических и гидравлических погружных насосов для промывки скважин в процессе бурения. : науч. изд. / Г.И. Неудачин и др. – Тр. Межвузовской концентрации. М. : Госгеолтехиздат, 1962.
- 5 Елманов, И.П. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом в многолетнемёрзлых породах: учеб. пособие / И.П. Елманов –М. : «Недра», 1965.
- 6 Магурдумов, А.М. Разведочное бурение с продувкой забоя воздухом : нач. изд. / А.М. Магурдумов – М. : «Недра», 1970.
- 7 Буткин, В. Д. Научные основы технологии высокопроизводительного бурения на открытых разработках угольной промышленности [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Буткин Владимир Дмитриевич. – Челябинск, 1979. – 419 с.
- 8 Катанов, Б. А. Теоретические и экспериментальные основы создания эффективных средств шнекопневматического бурения взрывных скважин на карьерах [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Катанов Борис Александрович. – Кемерово, 1989. – 335 с.
- 9 Воронов, Ю. Е. Методология проектирования станков вращательного бурения нового технического уровня для разрезов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук/ Воронов Юрий Евгеньевич. – Кемерово, 1996. – 377 с.
- 10 Перетолчин, В. А. Вращательное и шарошечное бурение скважин на карьерах [Текст] / В. А. Перетолчин. – М.: Недра, 1983. – 175 с.
- 11 Воздвиженский, Б.И. Буровая механика [Текст] / Б. И. Воздвиженский, М. Г. Васильев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ГНТИЛ ГеО, 1954. – 352 с.
- 12 Карабин, А. И. Сжатый воздух [Текст] / А. И. Карабин. – М.: Машиностроение, 1964. – 343 с.
- 13 Суреньянц, Я.С. Водяные скважины : науч. изд. / Я.С. Суреньянц – М. : «Недра», 1961.
- 14 Пат. 2281378 Российская Федерация, МПК E21B 10/44, 49/00. Способ эвакуации бурового шлама из скважины и устройство для его осуществления [Текст]/ Буткин В.Д., Гилев А.В., Чесноков В.Г., Нехорошев Д.Б [и др.]. - № 200413410/03; заявл. 27.10.04; опубл. 10.08.06, Бюл. №22.
- 15 Маковей, Н. Гидравлика бурения [Текст]/ Н. Маковей; пер. с рум. – М.: «Недра», 1986. – 536 с.
- 16 ПК Анкер Гео [Электронный ресурс]: Статья – Техника безопасности при проведении буровых работ, - Режим доступа: http://www.anker-pk.ru/poleznoe/spravochnik/tehnika_bezопасnosti_pri_provedenii_burovyh_rabot.
- 17 Сулакшин, С. С. Технология бурения геологоразведочных скважин [Текст] / С. С. Сулакшин. – М.: Недра, 1973. – 320 с.